



INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO
Universidade Técnica de Lisboa

Avaliação do Comportamento Mecânico de Blindagens Balísticas

José Manuel Grilo Taveira Pinto

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Júri

| | |
|----------------|--|
| Presidente: | Prof. Rui Manuel dos Santos Oliveira Baptista |
| Orientador: | Prof. Pedro Alexandre Rodrigues Carvalho Rosa |
| Co-orientador: | Prof. Paulo António Firme Martins |
| Vogais: | Coronel Eng. António José Rodrigues Bastos |
| | Tenente-Coronel Eng. João Paulo Barreiros Pereira da Silva |

Setembro de 2009

"Nada do que fazemos ou pensamos é trivial ou irrelevante, porque tudo o que fazemos tem consequências no domínio das mudanças estruturais a que pertencemos"

Humberto Maturana

AGRADECIMENTOS

O autor deste trabalho deseja manifestar o seu profundo agradecimento, para com todos aqueles que tiveram a gentileza de partilhar a sua sabedoria e sensatez e que contribuíram e ajudaram na orientação científico-pedagógica e didáctica deste trabalho. De referir em especial:

À Academia Militar, em especial ao Coronel Eng. António José Rodrigues Bastos, por toda a dedicação a uma causa, pois foi graças à sua determinação, empenho e persistência que este projecto teve capacidade de alcançar os objectivos desejados. Foi devido a este que a grande verba envolvida no projecto foi possível e por isso o muito obrigado.

Ao meu orientador científico, Professor Pedro Alexandre Rodrigues Carvalho Rosa, pelo apoio, dedicação, esforço e transmissão de conhecimento permanentemente oferecidos. Foi uma pessoa incansável e sempre disponível e pronta a ajudar, reconheço também aqui o seu enorme esforço para que este trabalho tivesse condições de avançar.

Ao Mestre Carlos Manuel Alves da Silva, pela dedicação e apoio incansável, bem como pela transmissão de conhecimentos constantes que em muito beneficiou o meu trabalho e em muito me ajudou a evoluir como futuro Engenheiro. Uma excelente pessoa, de quem guardo um enorme apreço e reconhecimento.

Ao Mestre Valentino Cristino, pela ajuda e pelos conselhos prestados nas mais diversas situações que foram surgindo na realização deste trabalho, em especial no que diz respeito à experiência que este tem de laboratório e que sempre pretendeu transmitir. Um excelente profissional, que dedica todas as suas capacidades em prol dos outros.

Ao Mestre Ivo Manuel Ferreira de Bragança, pela ajuda, conhecimento e conselhos transmitidos ao longo deste trabalho.

À Área Científica de Tecnologia Mecânica e Gestão Industrial do Instituto Superior Técnico e respectivos membros agradeço todas as facilidades e meios concedidos que tornaram possível a realização desta dissertação.

Ao Aluno João Silva, que se encontrava na Área Científica de Tecnologia Mecânica e Gestão Industrial do Instituto Superior Técnico como Bolseiro de Licenciatura, pela sua ajuda na realização de diversos trabalhos.

Aos colegas e companheiros, Tiago, Gabriel, Vargas e Joaquim que se encontravam a desenvolver as suas dissertações, pela ajuda, animo e apoio prestado.

Aos meus verdadeiros amigos e camaradas que sempre me apoiaram.

À minha família em especial ao “sobrinho” João, por ser a pessoa incansável que é, sempre disposta a ajudar-me.

Aos meus pais e irmão, por todo o apoio que me deram durante a realização deste trabalho e durante os 6 anos de duração do curso, difíceis mas deliciosos. As palavras seriam poucas para demonstrar o meu agradecimento.

À Ana, por ter sempre acreditado nas minhas capacidades e acima de tudo pelo apoio incondicional que sempre demonstrou, encontrando-se sempre a meu lado nos momentos mais difíceis.

RESUMO

Desde os primórdios da história, o ser humano tem procurado criar e aperfeiçoar mecanismos que o protejam das agressões do inimigo. Neste sentido, o desenvolvimento técnico e científico em torno das blindagens tem procurado contrariar o constante aperfeiçoamento dos projecteis e do seu poder de penetração. De facto, as blindagens são muitas vezes desenvolvidas para fins específicos de forma a aumentar o seu desempenho na protecção de pessoas e equipamentos. Para cumprir este objectivo, é muitas vezes necessário recorrer a soluções inovadoras, tanto em termos dos materiais e da respectiva qualidade/quantidade utilizada no fabrico, como ao nível do formato da própria blindagem.

A avaliação do desempenho das blindagens é extremamente importante para garantir a segurança do utilizador nas mais diversas actividades, tanto militares, como civis. No entanto, esta informação é considerada muitas vezes sigilosa pelo risco que representa para a sociedade militar e civil, e/ou por fortes interesses económicos por parte das empresas que comercializam estes equipamentos de protecção. Quando realizada, esta avaliação restringe-se geralmente a aspectos meramente qualitativos, tais como a verificação do dano produzido pelo projectil. No entanto, não é usual avaliar o valor da energia remanescente de impacto que, não sendo absorvida pela blindagem, é transmitida ao utilizador ou equipamento. Por outras palavras, será a não penetrabilidade da blindagem uma condição suficiente para garantir a segurança?

A presente investigação incidiu no desenvolvimento de uma metodologia experimental inovadora que permita quantificar a energia remanescente de impacto, transmitida através da blindagem ao utilizador, a quando da interacção com o projectil. Para permitir realizar os ensaios balísticos em condições laboratoriais controladas foi desenvolvido um sistema de impulsão electromagnética que possibilita a ausência de ruído, de fumos ou clarões, consentindo o disparo de diferentes tipos de projecteis com ajuste contínuo da energia de impacto. Para testar a metodologia desenvolvida foram utilizadas blindagens representativas das actividades do Exército Português. De facto, o contributo do presente trabalho permite preencher uma lacuna na avaliação de blindagens, apresentando-se como uma mais-valia, na medida que poderá ser utilizado futuramente pelo Exército Português para uma avaliação independente de blindagens.

ABSTRACT

Since the earliest Civilizations, men have sought to develop armours for extra protection against enemies' aggressions. In this sense, the scientific and technical development of armours counteracts the constant improvement of the weapons and their piercing power. In fact, the armours are often developed for specific purposes in order to enhance their performance in protecting people and equipment. To meet this objective, it is often necessary to use innovative solutions, in terms of materials and their quality/quantity used in the manufacture and the type of the armour itself.

The armour efficiency evaluation is extremely important to ensure the safety of the user in many activities, both military and civilian. However, this information is usually considered confidential, due to the risk that it poses to the military and civil society, and/or the strong economic interests of the companies that commercialize protective equipment. When these tests are performed, the results are generally restricted to merely qualitative aspects, such as the damage done by the projectile. However, it is not common to assess the value of the remaining energy of the impact that is not absorbed by the armour, which is transmitted to the user or equipment. In other words, is it sufficient the piercing of the armour to ensure the safety of the user?

The present thesis focused on the development of an innovative experimental methodology to quantify the residual energy transmitted through the armour to the user from the impact of the projectile. To allow the necessary ballistic tests under controlled laboratory conditions, a new electromagnetic impulse system has been developed. It has the advantages of the absence of noise, smoke or lights, and also allows testing different types of projectiles with continuous adjustment of the impact energy. The test methodology was assessed with different types of armour in service at the Portuguese Army. In fact, the present work fills the gap in the evaluation of personal armours, as an asset that can be applied in the future by the Portuguese army for an independent evaluation of personal armours.

PALAVRAS-CHAVE

Avaliação de blindagens

Energia remanescente

Degradação das blindagens

Impulsão electromagnética

KEY - WORDS

Evaluation of shielding

Energy balance

Degradation of shielding

Impulse electromagnetic

ÍNDICE

| | |
|---|-------|
| AGRADECIMENTOS..... | I |
| RESUMO | III |
| ABSTRACT | V |
| PALAVRAS-CHAVE | VII |
| KEY - WORDS | VII |
| ÍNDICE..... | IX |
| LISTA DE FIGURAS..... | XI |
| LISTA DE TABELAS..... | XV |
| ABREVIATURAS..... | XVIII |
| CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1. Enquadramento..... | 1 |
| 1.2. Interesse Militar e Científico | 1 |
| 1.3. Objectivos..... | 1 |
| 1.4. Estrutura do Trabalho | 2 |
| CAPÍTULO 2 - ESTADO DA ARTE | 3 |
| 2.1. Elementos Balísticos..... | 3 |
| 2.1.1. Blindagens | 3 |
| 2.1.2. Munições de Armas Ligeiras..... | 7 |
| 2.2. Avaliação de blindagens | 13 |
| 2.3. A Técnica da Barra de Hopkinson nos Ensaios de Balística..... | 17 |
| 2.3.1. Barra de Hopkinson e Caracterização Mecânica dos Materiais | 17 |
| 2.3.2. Disparador Electromagnético..... | 18 |
| CAPÍTULO 3 - FUNDAMENTOS TEÓRICOS | 23 |
| 3.1. Fundamentos de Circuitos Eléctricos | 23 |
| 3.1.1. Definições e Leis..... | 23 |
| 3.1.2. Circuito RLC | 24 |
| 3.1.3. Descarga do RCL | 26 |
| 3.2. Fundamentos de Electromagnetismo | 28 |

| | |
|---|----|
| 3.2.1. Lei de Biot–Savart..... | 28 |
| 3.2.2. Lei de Ampère | 29 |
| 3.2.3. Princípio de relutância magnética..... | 29 |
| 3.2.4. O Campo Magnético e os materiais | 30 |
| 3.3. Barra de Hopkinson | 31 |
| 3.3.2. Equações da Barra de Hopkinson..... | 34 |
| CAPÍTULO 4 - DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL | 39 |
| 4.1. Conceito da Bancada de Ensaios..... | 39 |
| 4.2. Elementos estruturais | 40 |
| 4.3. Disparador Electromagnético..... | 43 |
| 4.3.1. Princípio de Funcionamento do Disparador | 43 |
| 4.3.2. Concepção e fabrico | 45 |
| 4.4. Banco de Potência..... | 47 |
| 4.5. Controlo e monitorização..... | 51 |
| 4.5.1. Tradutor de Carga | 51 |
| 4.5.2. Sensor de deslocamento | 53 |
| 4.5.3. Placa de aquisição e controlo..... | 55 |
| 4.5.4. Instrumentos de medição suplementares | 55 |
| 4.6. Blindagens Balísticas Seleccionadas..... | 56 |
| 4.7. Plano de ensaios..... | 56 |
| CAPÍTULO 5 - RESULTADOS E DISCUSSÃO | 59 |
| 5.1. Comportamento Mecânico Comparativo das Blindagens | 59 |
| 5.2. Comportamento Mecânico e Degradação das Blindagens | 64 |
| CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO | 71 |
| 6.1. Conclusões..... | 71 |
| 6.2. Trabalho Futuro..... | 73 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 75 |
| ANEXOS | i |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 2.1 - Exemplo de coletes anti-bala utilizados pelo Exército Português. | 5 |
| Figura 2.2 - Fibras flexíveis de aramida. | 5 |
| Figura 2.3 - Placa táctica composta por fibras de Kevlar. | 6 |
| Figura 2.4 - Escudo anti- tumulto. | 7 |
| Figura 2.5 - Capacete Balístico. | 7 |
| Figura 2.6 – a) Munição de calibre 5.56 mm. b) Munição de calibre 9 mm. | 8 |
| Figura 2.7 - Munição de armas ligeiras. | 8 |
| Figura 2.8 - Projétil em corte transversal, com as três zonas distintas. | 9 |
| Figura 2.9 - Fotografia de um projétil com a representação das perturbações envolventes: 1) força de compressão sobre a ponta do projétil; 2) componente de fricção do ar sobre as superfícies e laterais do projétil; 3) força de sucção na retaguarda do projétil. | 10 |
| Figura 2.10 - Trajectória do projétil a partir do momento que abandona o cano da arma [16]. | 10 |
| Figura 2.11- Representação do Ângulo incidente. | 11 |
| Figura 2.12 - Trajectória possível do projétil de 5.56mm e gama de valores energéticos para uma distância de 202m [23]. | 12 |
| Figura 2.13 – Trajectória possível do projétil de 9mm e gama de valores energéticos para uma distância de 50m [23]. | 13 |
| Figura 2.14 - Ensaios balísticos realizados em tecidos de aramida [13]. | 13 |
| Figura 2.15 – a) - Cavidade resultante do ensaio realizado por um projétil 5.56mm a 200 metros. | 14 |
| Figura 2.16 - Esquema ilustrativo do sistema sequencial de avaliação de blindagens [27]. | 15 |
| Figura 2.17 - Suporte da blindagem em caixa contendo um bloco homogéneo de material deformável, antes e depois do impacto de um projétil [27]. | 15 |
| Figura 2.18 – a) - Sistema de fixação do colete no suporte da blindagem. b) - Ensaio segundo a norma NIJ Standard – 0101.04 [27]. | 16 |
| Figura 2.19 – a) - Estrutura de ensaios de armas perfurantes; b) - suporte e arma perfurante [27]. | 16 |
| Figura 2.20 - Barra de Hopkinson. | 17 |
| Figura 2.21 - Princípio de funcionamento de uma barra de Hopkinson: (a) Esquema simplificado do equipamento; (b) Monitorização típica dos sinais obtidos nos extensómetros. | 18 |
| Figura 2.22 - Representação esquemática do sistema de Hopkinson, com impulsão electromagnética do projétil, implementado para a avaliação da energia remanescente de impacto transmitida através de blindagens balísticas [13]. | 18 |
| Figura 2.23 – a) - Princípio de relutância magnética [45]. b) - Primeiros Protótipos realizados [46]. | 19 |

| | |
|--|----|
| Figura 2.24 – a) - Disparador sequencial de três bobinas [13]. b) - Exemplo ilustrativo de uma descarga/disparo sequencial..... | 20 |
| Figura 2.25 – a) - Disparador Simultâneo. b) - Exemplo ilustrativo de uma descarga/disparo simultâneo. | 21 |
| Figura 2.26 – a) – Unidade de potência implementado no segundo protótipo [13]..... | 22 |
| Figura 3.1 – Circuitos base: a) Esquema de ligações de um circuito <i>RLC</i> [49]; b) Circuito <i>RC</i> com fonte de tensão [50]. | 25 |
| Figura 3.2 - Evolução da tensão num condensador inicialmente descarregado [50]. | 25 |
| Figura 3.3 - Produção de um campo magnético, através da passagem de uma corrente <i>I</i> , numa bobina. | 26 |
| Figura 3.4 – Descarga de um circuito <i>RLC</i> ; a) Descarga <i>RLC</i> sobre-amortecida; b) Resposta criticamente amortecida; c) Resposta sub-amortecida. | 27 |
| Figura 3.5 - Campo criado por um fio rectilíneo. | 28 |
| Figura 3.6 - Lei de Ampère aplicada a uma bobina [54]. | 29 |
| Figura 3.7 – a) - Esquema representativo do sentido das forças magnéticas no interior da bobina aquando da aproximação de um núcleo ferromagnético. b) - Esquema da concentração das linhas de fluxo magnético por meio de um escudo magnético. | 30 |
| Figura 3.8 – Procedimento a seguir no tratamento de dados. | 32 |
| Figura 3.9 - Verificação da dispersão na onda reflectida. | 32 |
| Figura 3.10 – Esquema teórico do funcionamento da Barra de Hopkinson [56]. | 34 |
| Figura 4.1 - Modelo 3D da Bancada de Ensaio Balísticos. | 40 |
| Figura 4.2 – a) - Modelo 3D da barra incidente com a representação do escatél. b) – Modelo 3D Chaveta utilizada para fazer o guiamento da barra, através do escatél. c) – Modelo 3D da chaveta no grampo de fixação do suporte da barra. | 41 |
| Figura 4.3– Projecto de componentes para guiamento e fixação: a) Aro para fixação do disparador electromagnético. b) Chumaceiras com casquilhos de teflon. c) Grampo para fixação das chumaceiras. d) Dispositivo de fixação da barra transmissora. e) Matriz para fixação das blindagens. | 42 |
| Figura 4.4 – Fabrico de montagem de componentes para guiamento e fixação: a) Aro para fixação do disparador electromagnético. b) Grampo para fixação das chumaceiras. c) Matriz para acoplamento dos diferentes projecteis. d) Dispositivo de fixação da barra transmissora. e) Matriz para fixação das blindagens. | 42 |
| Figura 4.5 - Representação em detalhe do disparador electromagnético - vista em corte. | 43 |
| Figura 4.6 - Esquema do comportamento dos binómios bobina/núcleo ferromagnético – Linhas de campo criadas na bobina e respectiva polarização a quando da aproximação de um núcleo ferromagnético. | 44 |
| Figura 4.7 – a) - Material necessário à montagem da bobina. b) - Desenvolvimento da bobina. | 46 |

| | |
|---|----|
| Figura 4.8 – a) Modelo 3D dos núcleos ferromagnéticos. b) Barra de Impacto com os núcleos. c) Casquilho de atrito auto-lubrificante..... | 47 |
| Figura 4.9- Esquema eléctrico do banco de potência utilizado para efectuar a descarga eléctrica nas bobinas do actuador de relutância magnética. | 48 |
| Figura 4.10 – a) - Programa desenvolvido para a activação dos relés. b) - Placa de Circuito Impresso desenvolvida..... | 49 |
| Figura 4.11 – a) - Variação da corrente durante o tempo de carga dos carregadores, para $V=450V$, $R=210\Omega$ e $C=6000\mu F$, dos 0 a 4 segundos. b) - Aparato experimental de verificação da funcionalidade do circuito de carga..... | 49 |
| Figura 4.12– a) Modelo 3D de um banco de potência modular. b) Bases para os condensadores. c) Sistema de fixação implementado quer para o diodo, quer para o tiristore. d) Bancos de Potência modulares referentes às cinco bobinas. | 50 |
| Figura 4.13 Consola de controlos e monitorização da carga e descarga do circuito. | 51 |
| Figura 4.14 – a) Extensómetro uniaxial. b) Ponte de Wheatstone. c) Montagem de extensómetros na barra transmissora implementada. d) Produtos e utensílios utilizados na elaboração da célula de carga. | 52 |
| Figura 4.15 – a) Calibração da célula de carga a partir da Célula de carga <i>HBM C9B 50kN</i> , b) Programa desenvolvido para aquisição dos sinais dos extensómetros, c) Amplificador 2310B.53 | |
| Figura 4.16 - a) Esquema representativo do funcionamento do sensor, b) Sensor de deslocamento e componentes, c) Programa desenvolvido para a aquisição do sinal do sensor de deslocamento. | 53 |
| Figura 4.17 – Dispositivo de Suporte do Sensor Alvo de Alumínio do Sensor | 54 |
| Figura 4.18 - Relação da velocidade do projectil com os valores de tensão dados pelo banco de potência, instantes antes de atingir a blindagem. | 55 |
| Figura 4.19 - Placa <i>NI-PCI-6070E</i> | 55 |
| Figura 4.20 – Bancada de ensaios para a avaliação de blindagens balísticas instalada no Instituto Superior Técnico..... | 56 |
| Figura 5.1- Esquema do Método de Funcionamento..... | 59 |
| Figura 5.2 - Evolução comparativa da força transmitida pelas blindagens após impacto do projectil de calibre 9mm. | 60 |
| Figura 5.3 - Evolução comparativa da força transmitida pelas blindagens após impacto do projectil de calibre 5,56mm. | 60 |
| Figura 5.4 - Evolução comparativa da força transmitida pelas blindagens (capacetes) após impacto do projectil de calibre 9mm..... | 61 |
| Figura 5.5 - Evolução comparativa da força transmitida pelas blindagens (capacetes) após impacto do projectil de calibre 5,56mm..... | 61 |
| Figura 5.6 - Evolução da força transmitida após o impacto do projectil de calibre 5.56mm, com a representação das várias fases existentes: a) - impacto na placa de aramida. b) impacto no tecido aramida. | 62 |

| | |
|--|----|
| Figura 5.7 - Evolução da força transmitida após o impacto do projectil de calibre 9mm, com a representação das várias fases existentes: a) - impacto na placa de aramida. b) impacto no tecido aramida. | 63 |
| Figura 5.8 – Impactos nas blindagens seleccionadas com recurso ao projectil 5,56mm; a)- Placa de Aramida; b)- Placa de Policarbonato; c)- Tecido de Aramida. | 64 |
| Figura 5.9 - Comparação de um projectil sem deformação (a) e de um com deformação (b) ... | 64 |
| Figura 5.10 – Impactos nas blindagens seleccionadas com recurso ao projectil 9mm; a)- Placa de Aramida; b)- Placa de Policarbonato; c)- Tecido de Aramida. | 65 |
| Figura 5.11 - Comparação de projecteis; a)- sem deformação; b)- deformação proveniente dos ensaios realizados na placa e tecido de aramida; c)- deformação proveniente do ensaio realizado na placa de policarbonato. | 65 |
| Figura 5.12 – Impacto no capacete balístico de kevlar com recurso ao projectil 5,56mm; a)- Face exterior; b)- Face interior. | 66 |
| Figura 5.13 - Impacto no capacete balístico de kevlar com recurso ao projectil 9mm; a)-Face exterior; b)- Face interior. | 66 |
| Figura 5.14 - Impacto no capacete balístico de Aço; a)- com recurso ao projectil 5,56mm; b)- com recurso ao projectil de 9mm; c)- Deformação do projectil de 5,56mm utilizado no impacto na blindagem. | 67 |
| Figura 5.15 - Evolução comparativa da força transmitida pelas blindagens após impacto do projectil de calibre 5,56mm. | 67 |
| Figura 5.16 – Evolução comparativa da força transmitida pelas blindagens após impacto do projectil de calibre 9mm. | 68 |
| Figura 5.17 – Segundo impacto na placa de policarbonato, com recurso ao projectil de 9mm. | 69 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Níveis de blindagem..... | 4 |
| Tabela 2 - Especificações dos projecteis de 5,56mm e 9mm [19-22]. | 11 |
| Tabela 3 - Material Seleccionado para efectuar os ensaios de caracterização. | 56 |
| Tabela 4 - Plano de Ensaios. | 57 |
| Tabela 5 - Fracção de energia absorvida pelas blindagens após os impactos realizados..... | 62 |
| Tabela 6- Fracção de energia absorvida pelas blindagens após o segundo impacto realizado. | 68 |
| | |
| Tabela A 1 - Principais propriedades do Kevlar | i |
| Tabela A 2 - Principais propriedades dos policarbonatos..... | i |
| Tabela A 3 - Principais propriedades do cobre utilizado no fabrico das bobinas. | v |

Nomenclatura

a – Calibre do Projétil

A_s – Área da Secção

A_n - Magnitude Real

B – Densidade de fluxo magnético

B_n - Magnitude Imaginária

C – Capacidade

C_0 - velocidade de uma onda de comprimento de onda infinito

C_n - velocidade da onda para cada frequência em particular

c – Coeficiente Balístico

E – Energia, Módulo de Young

F – Força

f – Resolução da frequência

H – Intensidade de campo magnético

I, i – Intensidade eléctrica

L – Indutância

m – Massa

N – Número de voltas, número total de pontos adquiridos

n – Índice Temporal

P – Potência Dissipada

Q, q – Carga eléctrica

R – Resistência eléctrica

r – Posição

s – Frequência angular complexa

t – Tempo

V – Potencial eléctrico

v – Potencial eléctrico, velocidade

x – Posição

Z – Impedância

Símbolos gregos

α – Constante de amortecimento

β – Constante de frequência

σ – Tensão

ε - Extensão

$\dot{\varepsilon}$ – Velocidade de deformação (Velocidade de Extensão)

ρ - Densidade do material

ζ – Constante de amortecimento

μ – Permeabilidade magnética

φ - Ângulo de Projecção

ϕ – Densidade de fluxo magnético, fase dispersiva

ω – Frequência angular

ABREVIATURAS

OTAN / NATO – Organização do Tratado Atlântico Norte / North Atlantic Organization.

IGBT – Insulated Gate Bipolar Transistor.

CAD – Computer - Aided Design

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento

Este trabalho enquadra-se numa cooperação tecnológica e científica entre a Secção de Tecnologia Mecânica do Instituto Superior Técnico e a Academia Militar do Exército Português, no âmbito da avaliação de blindagens balísticas, em particular, na avaliação da energia remanescente de impacto transmitida ao utilizador. Pretende-se, desta forma, desenvolver metodologias que possibilitem avaliar o comportamento mecânico das blindagens utilizadas pelo Exército Português em condições laboratoriais controladas.

1.2. Interesse Militar e Científico

A utilização de blindagens é de extrema importância no actual cenário de guerra moderno, assim como no cenário de guerrilha urbana. Compreender o nível de protecção balística em diferentes cenários (projecteis, estilhaços, armas brancas, ..) é uma necessidade para garantir a segurança das forças militares e policiais. Deste modo, o desenvolvimento de metodologias de avaliação do comportamento mecânico de blindagens são ferramentas preciosas para permitir seleccionar as protecções balísticas mais adequadas ao cenário de guerra da missão em causa.

A possibilidade de reproduzir diferentes situações de tiro real em condições laboratoriais controladas, onde seja possível variar a energia de impacto ou a forma como o projectil colide com a blindagem, associada à monitorização das principais variáveis físicas da interacção entre o projectil e a blindagem, é de importância fundamental para a compreensão do mecanismo de dissipação da energia de impacto. Procura-se igualmente criar condições para a realização de ensaios balísticos em diferentes acessórios de protecção (coletes balísticos, capacetes, escudos anti-tumulto, entre outros) e mais do que isso conhecer um dos aspectos que não é habitualmente considerado neste tipo de avaliação, mas que tem uma importância muito grande ao nível da segurança de pessoas e equipamentos, a energia de impacto que não é absorvida pela blindagem. A contabilização desta energia remanescente de impacto é particularmente crítica no caso de capacetes e coletes à prova de bala.

1.3. Objectivos

Este trabalho de investigação tem dois objectivos principais: 1) a concepção, o projecto e o fabrico de um equipamento de disparado electromagnético capaz de impulsionar projecteis em condições de energia próximas das verificadas em tiro real, assim como, de monitorizar os principais parâmetros de tiro; 2) a avaliação do comportamento mecânicos (níveis de

penetração, dano induzido e energia remanescente) de algumas blindagens utilizados pelo Exército Português quando solicitadas em condições de tiro real, simulado em condições laboratoriais controladas.

1.4. Estrutura do Trabalho

A presente tese de mestrado está estruturada em cinco capítulos, incluindo a presente introdução ao trabalho de investigação onde se apresentam as principais linhas condutoras de todo o trabalho, assim como, o seu enquadramento.

O segundo capítulo apresenta uma pesquisa bibliográfica referente aos métodos e técnicas existentes para avaliação de blindagens, para além da apresentação dos projectos de balística anteriormente realizados pela Academia Militar em conjunto com o Instituto Superior Técnico e que de certa forma serviram de base ao trabalho realizado nesta tese. Encontram-se também os elementos balísticos que foram utilizados na realização dos ensaios. Apresentada ainda uma descrição e síntese das propriedades desses elementos balísticos. É igualmente apresentada uma pequena descrição da barra de Hopkinson como técnica de caracterização mecânica de materiais a alta velocidade. Demonstra-se que recorrendo a ligeiras alterações da técnica de Hopkinson é possível realizar a caracterização de produto, tal como blindagens balísticas, da mesma forma que se realizam ensaios de compressão, tracção e torção [1], ou ensaios de caracterização à fractura dúctil [2].

No terceiro capítulo é exposta toda a fundamentação teórica por detrás da realização do trabalho realizado. É efectuada uma pequena descrição de alguns princípios de electricidade, electromagnetismo e barra de Hopkinson, com o intuito de expor alguns dos princípios de funcionamento da máquina de análise balística desenvolvida durante este trabalho.

O quarto capítulo expõe todo o desenvolvimento efectuado no sistema de ensaios balísticos, desde a fase de projecto até à sua concepção. É feita uma descrição do novo disparador electromagnético, bem de como todos os constituintes que o acompanham e proporcionam um correcto funcionamento. Por fim, segue-se ainda a descrição dos sistemas de aquisição/monitorização de dados utilizados nos ensaios balísticos.

No quinto capítulo, são apresentados e discutidos os resultados experimentais obtidos nos ensaios de caracterização das blindagens e no sexto e último capítulo são efectuadas as conclusões e perspectivas de trabalho futuro.

CAPÍTULO 2

ESTADO DA ARTE

Este capítulo apresenta o *estado-da-arte* no domínio da avaliação do desempenho de blindagens balísticas. Para introduzir o tema começa-se por apresentar os diversos elementos balísticos, as blindagens e as munições de armas ligeiras, cuja interacção constitui o objecto de estudo da presente tese. De seguida, apresentam-se os diferentes tipos de técnicas de avaliação de blindagens a nível nacional e internacional. Por último, apresentam-se especificamente desenvolvimentos no âmbito dos ensaios de balística por impulsão electromagnética por se tratar da técnica que irá ser utilizada e desenvolvida nesta tese.

2.1. Elementos Balísticos

O actual desenvolvimento técnico/científico em torno das blindagens tem procurado confrontar o constante aperfeiçoamento dos projecteis e do seu poder de penetração. Sendo as blindagens muitas vezes desenvolvidas para fins específicos de forma a aumentar o desempenho na protecção de pessoas e equipamentos. Para cumprir esse objectivo é muitas vezes necessário recorrer a soluções inovadoras, tanto em termos dos materiais e da respectiva qualidade/quantidade utilizada no seu fabrico, como ao nível do formato da própria blindagem. Sendo esta informação considerada muitas vezes sigilosa pelo risco que representa para a sociedade militar e civil, e/ou por fortes interesses económicos por parte das empresas que comercializam estes equipamentos de protecção. Nas próximas secções deste capítulo procura-se apresentar tanto quanto possível uma descrição completa do tema, utilizando por base sempre que possível elementos e nomenclatura normalizadas (base OTAN¹).

2.1.1. Blindagens

Esta secção incidirá essencialmente sobre blindagens pessoais (coletes anti-bala, capacetes balísticos e escudo anti-tumulto), visto serem os tipos de blindagem de maior interesse no espectro da conflitualidade actual, justificando os ensaios e caracterizações realizadas.

O “conceito” de blindagem tal como o conhecemos nos dias de hoje é recente, mas efectivamente desde os primeiros exércitos da história do homem, que tal era essencial e utilizado. A evolução das blindagens está em grande parte associada à evolução do armamento. O desenvolvimento verificado nas ciências dos materiais nas últimas décadas, possibilitou um progresso por parte das blindagens proporcional ao do armamento. Os novos materiais que surgiram permitiram conferir a protecção balística adequada, aliando uma redução significativa de peso, conferindo ao utilizador um bem-estar necessário.

¹ Organização do Tratado do Atlântico Norte.

Níveis de resistência balística

Antes de se abordar a composição das blindagens é essencial ter a noção de que existem normas definidas pelos países da OTAN, as quais regulam os níveis de blindagem existentes [3], definindo a correspondente capacidade de resistência balística². Estes níveis de blindagem são apresentados na tabela 1.

| Nível | Armas | Calibres e Munições | Velocidade média à saída do cano |
|---|---|---------------------------|----------------------------------|
| 1-A | Pistola | | |
| | Distância: 30 m Ângulo: azimute 360°; elev. 0°-30° | 9 x 19 mm Parabellum; | V=358 m/s |
| 1-B | Pistola – Metralhadora | | |
| | Distância: 30 m Ângulo: azimute 360°; elev. 0°-30° | 9 x 19 mm Parabellum; | V=426 m/s |
| 2 | Espingarda de Assalto | 7.62 x 51 mm NATO; | V=833 m/s |
| | Distância: 30 m | 5.56 x 45 mm NATO ss 109; | V=900 m/s |
| | Ângulo: azimute 360°; elev. 0°-30° | 5.56 x 45 mm NATO M 193; | V=937 m/s* |
| 3 | Espingarda de Assalto com munições penetrantes | | |
| | Distância: 30 m | 7.62 x 39 mm API BZ; | V=695 m/s* |
| | Ângulo: azimute 360°; elev. 0°-30° | | |
| 4 | Espingarda sniper com munições AP de tungsténio | 7.62 x 51 mm AP (WC); | V=930 m/s* |
| | Distância: 30 m | 7.62 x 54 mm R B32 API; | V=854 m/s* |
| | Ângulo: azimute 360°; elev. 0°-30° | | |
| 5 | Metralhadora Pesada: AP | | |
| | Distância: 200 m Ângulo: azimute 360°; elev. 0° | 14.5 x 114 mm API/B32; | V=911 m/s* |
| V* significa que a velocidade pode ter uma variação de 20 m/s | | | |

Tabela 1 - Níveis de blindagem

Colete anti-bala

Os coletes balísticos destinam-se a proteger as pessoas de impactos provenientes do exterior com elevada energia cinética. Apesar do seu emprego não garantir 100% de segurança, este assegura uma redução significativa da probabilidade do seu portador ser fatalmente ferido ou sofrer danos nos órgãos internos [4].

Além da segurança, outra característica que se deve destacar nos mais recentes coletes balísticos é a sua forma confortável. Com tecidos exteriores de nylon e um sistema de velcro nas costas, possibilita um adequado ajuste e máxima mobilidade, pouco peso e a possibilidade de adicionar placas tácticas (nível 2 ou 3) nas aberturas frontais laterais e traseiras como protecção adicional (Figura 2.1).

² A resistência balística corresponde à capacidade de um material resistir a penetrações de projectéis a velocidades elevadas.



Figura 2.1 - Exemplo de coletes anti-bala utilizados pelo Exército Português.

Como material base dos coletes são usadas actualmente modernas fibras balísticas, aramidas, que proporcionam um alto grau de resistência (nível 2), além de flexibilidade e conforto (Figura 2.2). A aramida é constituída por um composto formado por fibras leves e de alta resistência, às quais se agregaram resinas especiais. Como resultado, obtêm-se placas estruturadas com características morfológicas distintas, perfeitamente ajustáveis aos locais a serem protegidos, bastante resistentes, leves, semi-rígidas, que não perdem as suas propriedades balísticas em função do tempo ou agentes externos tais como a humidade. O tecido aramida mais conhecido e utilizado é o Kevlar³ que consiste numa fibra poliamida (da mesma família do Nylon) com carbonos em anéis aromáticos, daí receber o nome de aramida (*aromatic amid*). Desta forma, são conferidas à molécula grande rigidez e resistência mecânica. As fibras cruzadas são o resultado da junção de biliões destas moléculas que têm fortíssima interacção entre si, reforçando ainda mais estas propriedades. O Kevlar possui ainda grande resistência ao calor. As principais propriedades deste membro da família das fibras aramidas sintéticas estão indicadas na tabela A1 no anexo 1 [5].

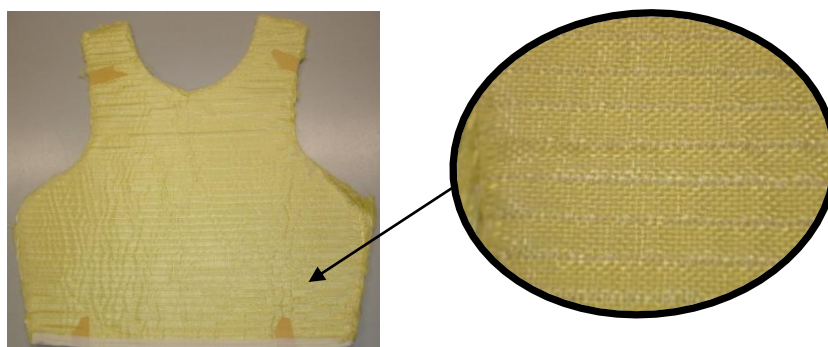


Figura 2.2 - Fibras flexíveis de aramida.

Podem ainda ser empregues polímeros alifáticos, como por exemplo o Spectra³ (polietileno de altíssimo peso molecular, isto é, formado por cadeias não aromáticas muito longas), contendo só carbono na cadeia. O comprimento da cadeia e o conseqüente grau de combinação molecular são responsáveis pelas propriedades mecânicas. Devido à ausência de interacções

³ O Kevlar e Spectra são marcas registadas e não tipos de material.

fortes, funde a temperaturas mais baixas, sendo sensível por exemplo, ao lança-chamas. Em compensação possui boas propriedades de ductilidade, sendo por isso usado em aplicações que exigem elevada resistência ao impacto.

Tal como foi referido, o nível de segurança assegurado pelos coletes balísticos pode ser aferido, através da junção de placas tácticas (Figura 2.3). Estas consistem numa protecção blindada extra, constituída por materiais rígidos.

Para uma correcta preparação dos revestimentos blindados e respectiva montagem nos coletes, usam-se uniões com adesivos, que garantem a não corrosão da aramida e alta resistência, pois aguentam os impactos balísticos sem se descolarem, impedindo a projecção de metais [6]. Quanto aos materiais utilizados, estes variam desde tecidos de aramida cozidos e polietileno de elevada densidade, que satisfazem o nível 2 da norma OTAN Stanag⁴ 4569 [3, 7], a configurações de esmalte (exigência do Exército Português), cerâmicos e aço [8, 9] que garantem o nível 3.

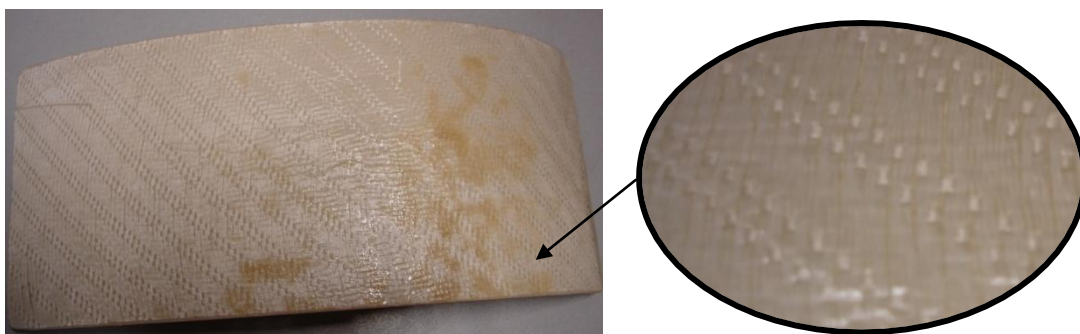


Figura 2.3 - Placa táctica composta por fibras de Kevlar.

Escudos anti-tumulto

Os escudos anti-tumulto (Figura 2.4) são muito utilizados nos dias de hoje, principalmente pelas forças de segurança, podendo também ser empregues em operações de apoio à paz. Estes são constituídos por policarbonato, que sendo um material termo-plástico, permite a associação de técnicas de transformação como a moldação (entre elas a conhecida *vacuum forming*) e encurvamento. Desta forma obtêm-se escudos com um raio de curvatura de 50 cm que não causam distorção óptica, não produzem estilhaços, resistem a impactos múltiplos e impossibilitam a propagação de fissuras. A função principal dos escudos anti – tumulto não é resistir a impactos balísticos (espessuras variam entre 4 a 6mm), mas variando a espessura do policarbonato é possível cumprir o nível 2 da norma Stanag 4569 [3]. Tais alterações de espessura ocorrem, segundo a norma UNE-EN-1063 [3, 6, 7, 10]. Todos os materiais implementados são ensaiados e verificados por laboratórios credenciados [8, 9], respeitando as condições ISO relativas à temperatura e humidade relativa (ISO 554-1976) e ao procedimento dos ensaios (número de impactos, distância, entre outros parâmetros) [11, 12]. Desta forma é mantido um controlo estrito, com a finalidade de assegurar o cumprimento das

⁴ NATO Standardization Agreement.

características técnicas dos mesmos, antes de serem aplicados como blindagens. As principais propriedades do policarbonato utilizado nos escudos são apresentadas na tabela A2 no anexo 2 [13].



Figura 2.4 - Escudo anti- tumulto.

Capacetes Balísticos

Os capacetes balísticos estão destinados a proteger o usuário contra lesões causadas por projecteis balísticos provenientes de armas de fogo, até ao nível de protecção balística III, conforme a norma de protecção.

O material presente neste tipo de protecção balística, pode ser aço, tecidos de nylon, metais, cerâmicos, mas nos dias de hoje o mais usual é este ser confeccionado em aramida pré-impregnada com resinas e enformado a quente. Devem possuir quatro furos destinados ao encaixe do suporte interno, feito em nylon resistente revestido por couro, com almofadas para amortecimento de impacto na região frontal, lateral, dorsal e topo fixados com velcro. O suporte, de modo a possibilitar um maior conforto, deve permitir uma fácil regulação.



Figura 2.5 - Capacete Balístico.

2.1.2. Munições de Armas Ligeiras

Após o início dos anos 60, Portugal deixou de acompanhar o ritmo de inovação do armamento ligeiro⁵ dos parceiros da NATO. Enquanto Portugal se empenhava nas guerras de África (1961 – 1974), os outros parceiros da NATO transitam para um armamento ligeiro diferente, marcado principalmente pela adopção da munição 5.56 x 45 mm NATO para espingardas de assalto e metralhadoras (permitindo obter armas mais leves e compactas) e mantendo a munição 9 x 19 mm Parabellum para pistolas [14].

⁵ Armas de fogo transportadas por um só Homem.

O Exército Português, nos últimos anos tem vindo a preparar uma reestruturação do armamento nacional, com vista a uma convergência de doutrinas comparativamente aos parceiros NATO. Deste modo, de forma a tornar o presente trabalho adaptado à futura realidade foram seleccionadas as munições de calibre⁶ (NATO) 5.56 mm e o de 9 mm (Figura 2.6).



Figura 2.6 – a) Munição de calibre 5.56 mm. b) Munição de calibre 9 mm.

Para uniformizar os termos utilizados, convém compreender as características das munições em questão, bem como alguma terminologia militar, utilizada nestas ocasiões. A munição das armas ligeiras (Figura 2.7) compõe-se em quatro partes fundamentais:

- Projétil (1);
- Invólucro, caixa ou estojo (2);
- Escorva, cápsula ou fulminante (3);
- Carga (4).

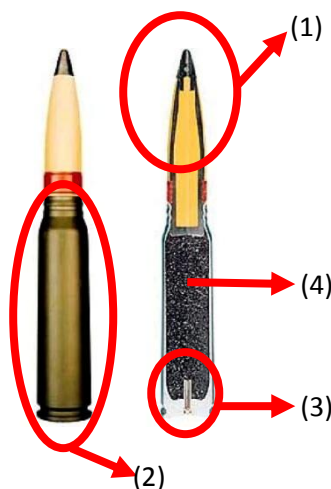


Figura 2.7 - Munição de armas ligeiras.

No presente trabalho, uma vez que a propulsão é efectuada através do disparador electromagnético, só o projétil tem verdadeiramente interesse, pois os restantes (invólucro, escorva e carga) são meios destinados a provocar a sua propulsão em armas de fogo, que ficam por efeito do tiro, total ou parcialmente inutilizados para os tiros seguintes.

O projétil corresponde ao componente essencial da munição destinado a provocar os efeitos desejados no objectivo, sendo a única parte da munição que passa pelo cano da arma e

⁶O calibre de uma munição é o diâmetro do projétil utilizado numa arma de fogo.

atinge o alvo. Em geral o material do projectil deve apresentar algumas características essenciais: densidade elevada, para facilmente adquirir grande energia; ser infusível, para não se fundir com o atrito na alma da arma e ser deformável, de acordo com o seu destino, vulnerante⁷ ou derrubante⁸ [15].

Quanto à sua composição química, o projectil divide-se fundamentalmente em três regiões (Figura 2.8): 1) Coifa, apenas nas munições perfurantes, em chumbo e destina-se a auxiliar a penetração do núcleo; 2) Camisa, suficientemente espessa para evitar a fusão do núcleo e pouco dura para não deteriorar as estrias da arma, apresentando-se em norma em cobre ou na liga de cobre e níquel; 3) Núcleo, que pode ser de chumbo, de bronze, ou de aço, mas por razões de preço e peso prefere-se o primeiro que no entanto é quase sempre endurecido sendo ligado com estanho ou antimónio.

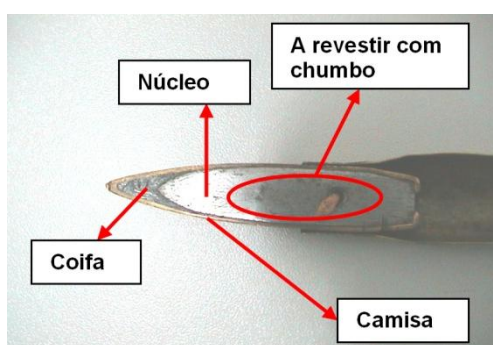


Figura 2.8 - Projectil em corte transversal, com as três zonas distintas.

Comportamento Dinâmico de um projectil

A ciência que se ocupa do estudo dos movimentos dos projecteis desde que saem da boca das armas até encontrarem o seu objectivo é a balística externa.

As duas principais forças que actuam sobre os projecteis durante o seu deslocamento na atmosfera são: 1) A força da gravidade ou atracção terrestre; 2) A resistência do ar aos seus movimentos.

Apesar da atracção terrestre ser bastante importante, a força a ter mais em conta é a resistência do ar (Figura 2.9), que tem três componentes: a força de sucção provocada pelo vácuo na base do projectil; uma componente de compressão sobre a ponta do projectil, devida a uma compressão do ar naquela zona; uma componente de fricção do ar sobre as superfícies e protuberâncias laterais do projectil. Para velocidades subsónicas do projectil a componente de resistência mais importante é a de sucção, enquanto para velocidades supersónicas a resistência por compressão é a mais importante.

⁷ **Poder Vulnerante (que vulnera, fere):** Energia mínima que um projectil deve possuir para colocar um homem fora de combate. Nas espingardas automáticas actuais é de 8 Kg/cm², desde que o projectil chegue ao alvo com uma velocidade restante de 50m/s. Quanto maior for a penetração tanto maior será o poder vulnerante.

⁸ **Poder Derrubante:** Energia mínima que um projectil deve possuir para eliminar imediatamente um homem. Nas armas de defesa pessoal (leia-se armas ofensivas, de projecção, de fogo e de tiro semi-automático, pistolas e revólveres) a energia é de 30 Kg/cm². Com estas armas de “defesa” pretende-se não uma grande força de penetração, mas sim, a produção de lesões que eliminem imediatamente um homem.

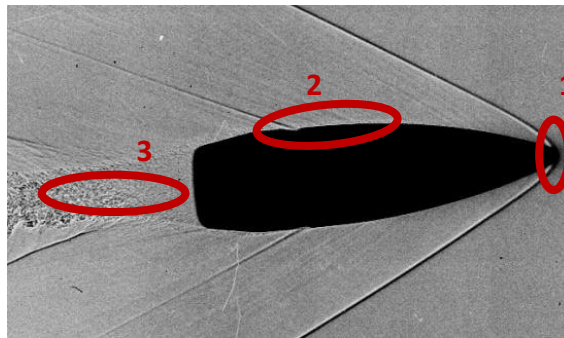


Figura 2.9 - Fotografia de um projectil com a representação das perturbações envolventes: 1) força de compressão sobre a ponta do projectil; 2) componente de fricção do ar sobre as superfícies e laterais do projectil; 3) força de sucção na retaguarda do projectil.

A trajectória do projectil a quando a saída do cano da arma, é a curva descrita pelo centro de gravidade deste, no seu movimento de translação através da atmosfera (Figura 2.10). A partir da figura 2.10 é possível fazer referência a alguma terminologia balística que ajudará a identificar as trajectórias típicas dos projecteis. Assim sendo, identificam-se as seguintes terminologias [16, 17]: Origem da trajectória (O), que é o centro da boca da arma no momento em que o projectil abandona a alma; Horizonte da arma, que se define como o plano horizontal que passa pela origem da trajectória (pode em determinada literatura ter a designação de “Height of Sight line”); Linha de projecção (OT), é o prolongamento do eixo da alma no momento em que o projectil a abandona, é portanto a direcção de v_0 (velocidade inicial); Ângulo de Projecção (φ), que é o ângulo (TÔC) que a linha de projecção faz com o horizonte, este pode ser negativo ou positivo, conforme a linha de projecção esteja acima ou abaixo do horizonte; Ponto de queda (C), que é o segundo ponto em que a trajectória encontra o horizonte da arma. De referir que o ponto (C) pode não corresponder ao embate do projectil num objecto (em alguma literatura pode ter a designação de “Zero Range”).

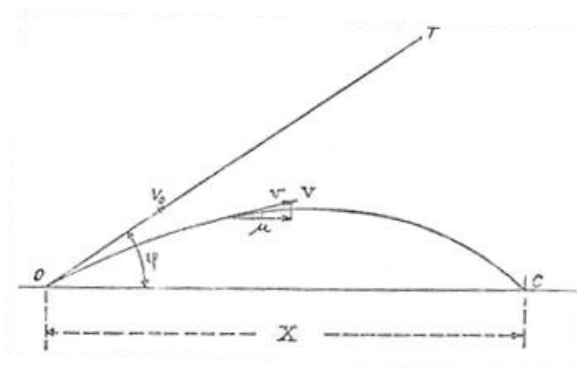


Figura 2.10 - Trajectória do projectil a partir do momento que abandona o cano da arma [16].

Para o projecto em causa é necessário definir também o ângulo incidente (angle of incidence), que se traduz como o ângulo entre a linha de voo do projectil e a perpendicular ao plano tangente ao ponto de impacto (Figura 2.11) [18].

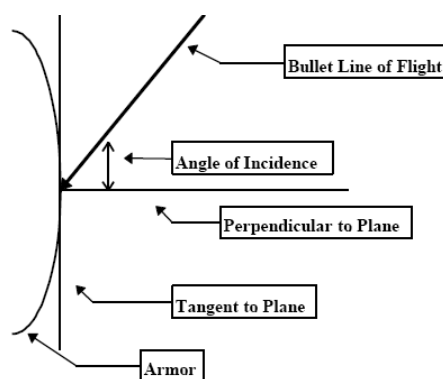


Figura 2.11- Representação do Ângulo incidente.

Projéteis típicos

O projétil de calibre 9 mm destina-se a causar danos elevados a curtas distâncias (efeito derrubante), enquanto o de 5.56 mm se destina a espingardas de assalto onde se pretende uma elevada capacidade de penetração a alcances elevados (efeito penetrante).

É de extrema importância para o trabalho ter informações como, massas, dimensões entre outras dos projéteis que serão utilizados nos ensaios balísticos. As especificações destes, no que diz respeito a velocidades, energias e alcances eficazes, podem variar dependendo da carga e do desempenho, baseado no comprimento do cano da arma utilizada.

| | Massa | Dimensões | Velocidade à saída da arma | Energia à saída da arma | Alcance Eficaz médio |
|-----------------|-------|--------------|----------------------------|-------------------------|----------------------|
| Projétil 5,56mm | 4 g | 5,56 x 19 mm | 930 – 772 m/s | 1830 – 1700 J | ≈ 500m |
| Projétil 9mm | 8 g | 9 x 15 mm | 430 – 350 m/s | 620 – 505 J | ≈ 50m |

Tabela 2 - Especificações dos projéteis de 5,56mm e 9mm [19-22].

Recorrendo a um programa de simulação de trajetórias de projéteis desenvolvido pela empresa Norma Precision - Ammunition⁹, pode-se ter uma referência das velocidades e energias do projétil em determinadas distâncias. Para a utilização deste programa é necessário definir o coeficiente balístico (c), que traduz a influência do peso do projétil e parcialmente a da sua forma e dimensões na aceleração resistente,¹⁰ dependendo ainda da densidade do ar ao nível do solo [14, 15]. O coeficiente balístico pode ser calculado através da

⁹ Norma Precision - Ammunition – empresa Sueca e Norueguesa, fundada em 1902 que se dedica ao fabrico de munições. É uma das maiores empresas em todo o mundo de produção de munições, com cerca de 23 de milhões produzidos em 70 calibres diferentes por ano.

¹⁰ A aceleração resistente corresponde à força que o meio ambiente opõe ao deslocamento do projétil.

Eq. 1, onde (p) traduz o peso do projectil em quilos e (a) o calibre do projectil em metros [16, 17].

$$c = \frac{P}{1000 \times a^2} \tag{Eq.1}$$

Assim aproveitando as valências deste programa, consegue-se ter disponível uma gama de valores energéticos aceitáveis e necessários à realização do presente trabalho, dentro do alcance eficaz médio de cada projectil. As trajetórias de seguida apresentadas são para valores energéticos aproximados aos dos ensaios realizados na presente tese.

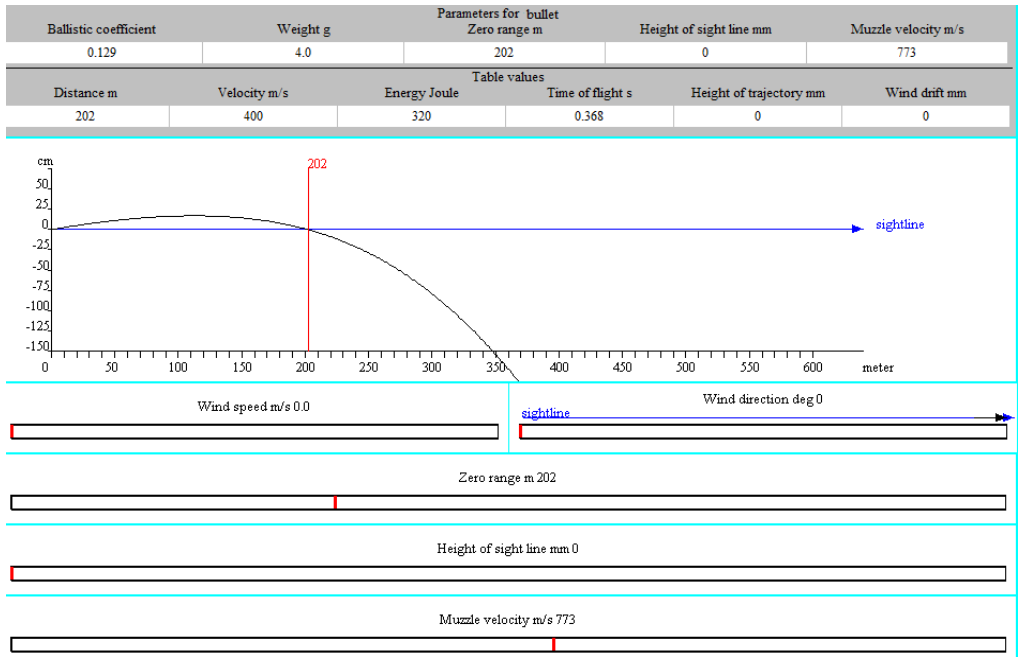


Figura 2.12 - Trajetória possível do projectil de 5.56mm e gama de valores energéticos para uma distância de 202m [23].

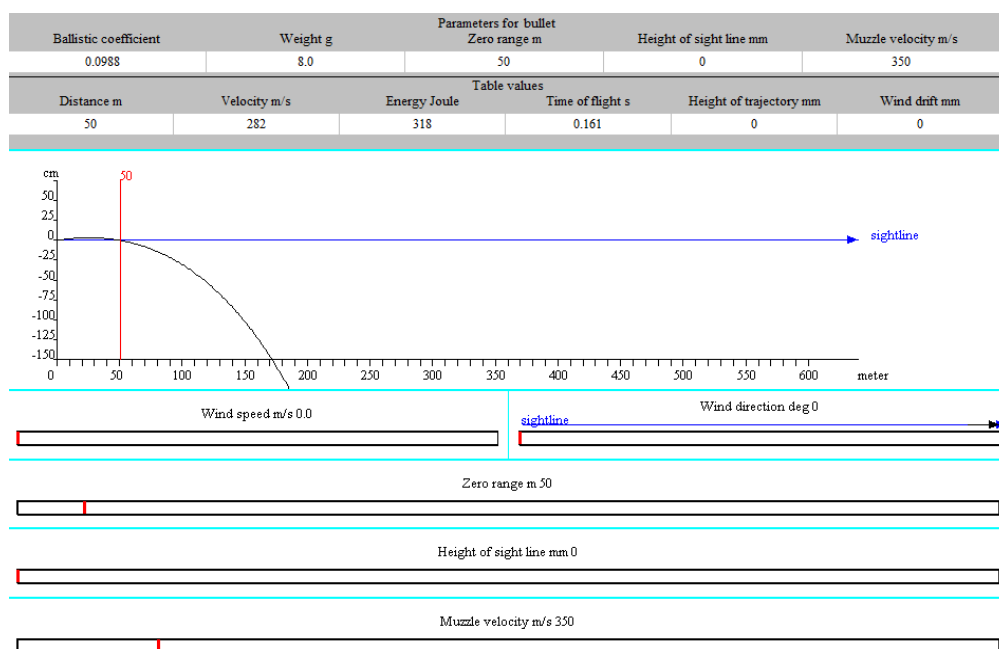


Figura 2.13 – Trajectória possível do projectil de 9mm e gama de valores energéticos para uma distância de 50m [23].

2.2. Avaliação de blindagens

Os ensaios de avaliação de blindagens em Portugal são na sua maioria realizados em campos de tiro apropriados (Campo de tiro de Alcochete, Campo Militar de Santa Margarida, Escola Prática de Artilharia em Vendas Novas, entre outros), de acordo com as normas NEB/T E-316, NIJ Std 0108.01, NIJ Std 0101.03 entre outras. Os ensaios são realizados com a execução de três disparos na blindagem, formando um triângulo (norma OTAN Stanag 4190) [24, 25] como representado na figura 2.14.

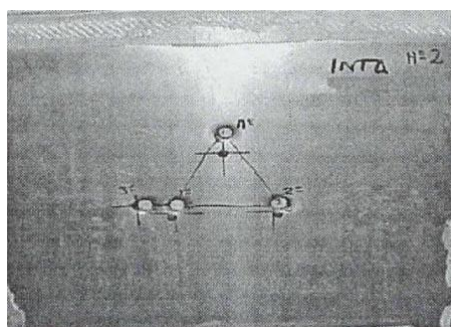


Figura 2.14 - Ensaios balísticos realizados em tecidos de aramida [13].

A grande lacuna no nosso País, no que diz respeito a este ponto, depara-se com a análise de resultados, uma vez que as conclusões deste tipo de ensaios são meramente qualitativas, ou seja, limitam-se a verificar unicamente os danos, em especial se determinado tipo de projectil perfura/penetra ou não a blindagem. Além dos disparos realizados contra as blindagens, um dos métodos qualitativos mais comum nos centros de investigação balística, consta da utilização de gelatina balística. Esta é um tipo de solução gelatinosa que tem por objectivo simular a densidade e a viscosidade do tecido muscular humano para analisar o

impacto do projectil sobre este. Efectuado o disparo, é realizada uma inspecção visual à gelatina balística para verificar os possíveis danos causados pelo impacto. Espelha assim os resultados de expansão mais próximos da realidade, tratando-se apenas de um método de inspecção visual utilizado para quantificar o poder de impacto. É possível desta forma não apenas testar blindagens, mas também melhorar a performance dos projecteis (Figura 2.15).



Figura 2.15 – a) - Cavidade resultante do ensaio realizado por um projectil 5.56mm a 200 metros.
b) - Comparação entre as cavidades temporárias resultantes de um projectil 9mm de cobre puro com ponta oca e de um projectil 9mm convencional [26].

Nesta técnica as amostras de blindagem a testar encontram-se colocadas imediatamente antes da gelatina e em contacto com esta. As amostras são convenientemente constrangidas de modo a que os danos na gelatina balística simulem da melhor forma o efeito do impacto no corpo humano.

Na verdade no que se refere a técnicas/métodos de análise/avaliação das energias de um disparo, absorvidas pela blindagem e as remanescentes transmitidas ao corpo humano, ainda existe uma grande lacuna, principalmente na quantificação da energia que não é absorvida pela blindagem. Tal facto dificulta a avaliação da eficiência das blindagens utilizadas pelo Exército Nacional, uma vez que realizar ensaios de avaliação de blindagens, não pode unicamente pressupor a penetrabilidade do projectil, tem também que verificar se a blindagem em termos energéticos minimiza a energia remanescente transmitida ao soldado/utilizador. Neste âmbito, este trabalho pretende desenvolver uma metodologia experimental que permita preencher esta lacuna na avaliação de blindagens.

Para além dos tradicionais ensaios de balística utilizados pelo exército português, existem outras técnicas utilizadas por diversos exércitos estrangeiros. Uma das soluções é utilizada pela H.P. White Laboratory, empresa que se dedica à avaliação das blindagens do exército Americano e que tem ligação ao Departamento de Justiça dos Estados Unidos. Os coletes balísticos são testados qualitativamente e quantitativamente. Para realizar as avaliações, está implementado um sistema sequencial, constituído pela arma de fogo (responsável pela propulsão do projectil), dois sensores de velocidade (permitindo conhecer o seu valor em determinado ponto desejado) e por último o suporte com a blindagem a analisar (Figura 2.16). Através dos sensores disponíveis é possível fazer uma avaliação das energias envolvidas no processo.

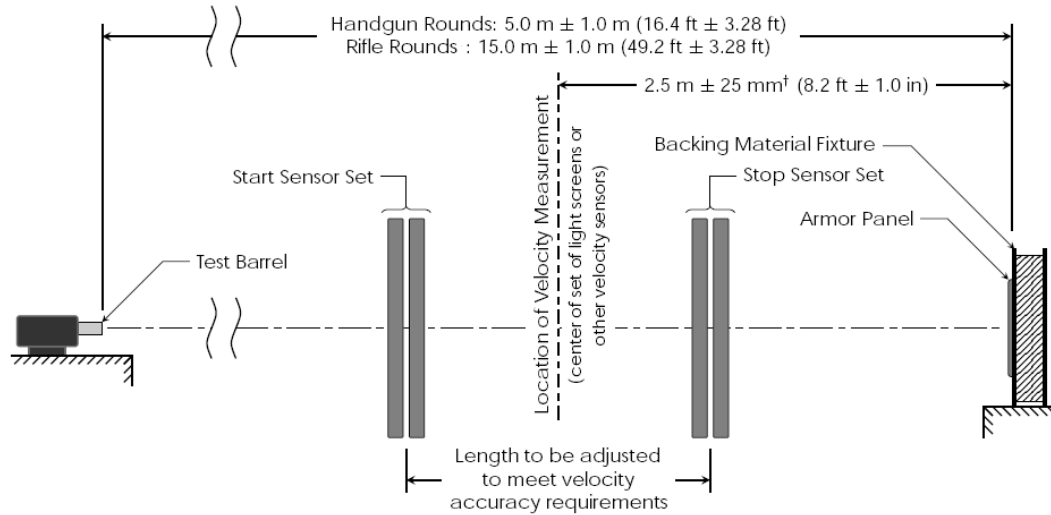


Figura 2.16 - Esquema ilustrativo do sistema sequencial de avaliação de blindagens [27].

Um ponto ainda interessante neste processo é o facto do suporte da blindagem ser uma caixa que contém um bloco homogêneo de material deformável (óleo à base de argila modelada), sendo este colocado em contacto com a parte de trás da blindagem (colete balístico) durante os ensaios. Desta forma aquando do ensaio, é definida a “assinatura do impacto”, que se traduz pelo maior nível de indentação sofrido no bloco homogêneo, sendo esta, medida através da distância paralela aos picos superiores e inferiores perpendiculares à superfície de impacto (BFS) (Figura 2.17).

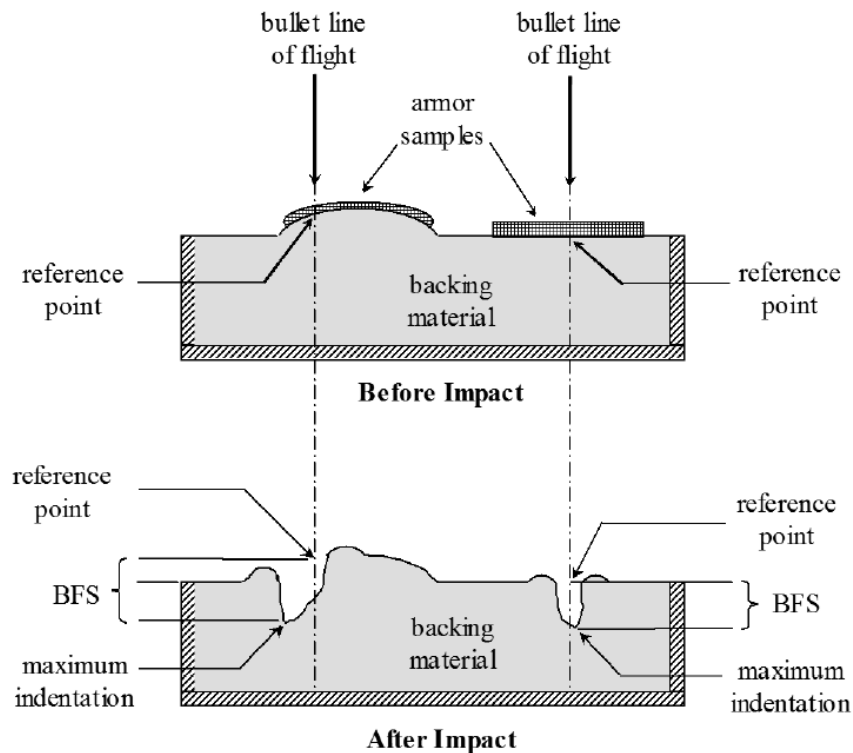


Figura 2.17 - Suporte da blindagem em caixa contendo um bloco homogêneo de material deformável, antes e depois do impacto de um projétil [27].

De referir ainda que no suporte da blindagem, se encontra o colete na sua totalidade, sendo este disposto como indicado na figura 2.18a. Os ensaios são efectuados segundo a norma NIJ Standard–0101.04 sendo realizados 6 disparos (Figura 2.18b) .

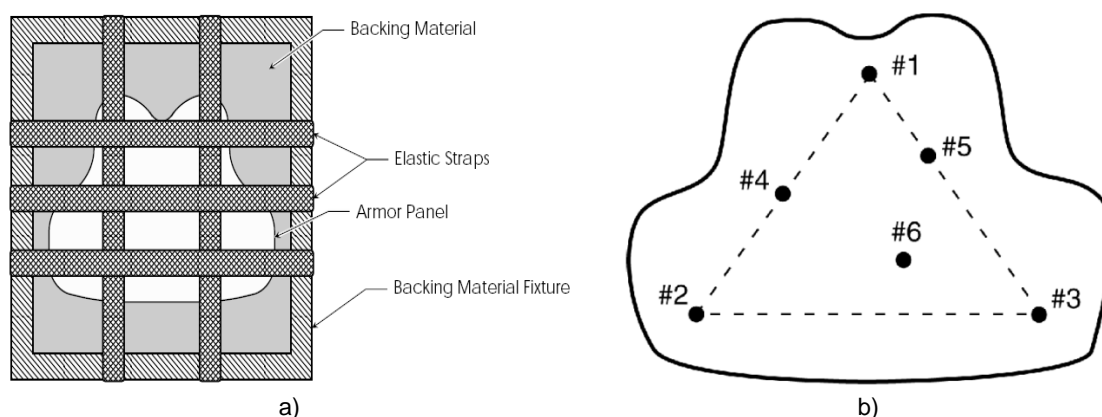


Figura 2.18 – a) - Sistema de fixação do colete no suporte da blindagem. b) - Ensaio segundo a norma NIJ Standard – 0101.04 [27].

Por último referir ainda, que os coletes são também testados para objectos perfurantes, como por exemplo espadas, facas ou até “pica gelo”. O método utilizado passa pela utilização de um mecanismo que tem por base um martelo de queda comum. Este faz uso de um tubo, que serve de guiamento à estrutura de suporte da arma perfurante e à própria (Figura 2.19). As energias envolvidas no processo são determinadas experimentalmente, recorrendo à utilização de pessoas que repetidamente efectuam o movimento de ataque com uma arma perfurante. O tubo guia, contém ainda sensores que permitem verificar e manter os níveis de energia desejados.

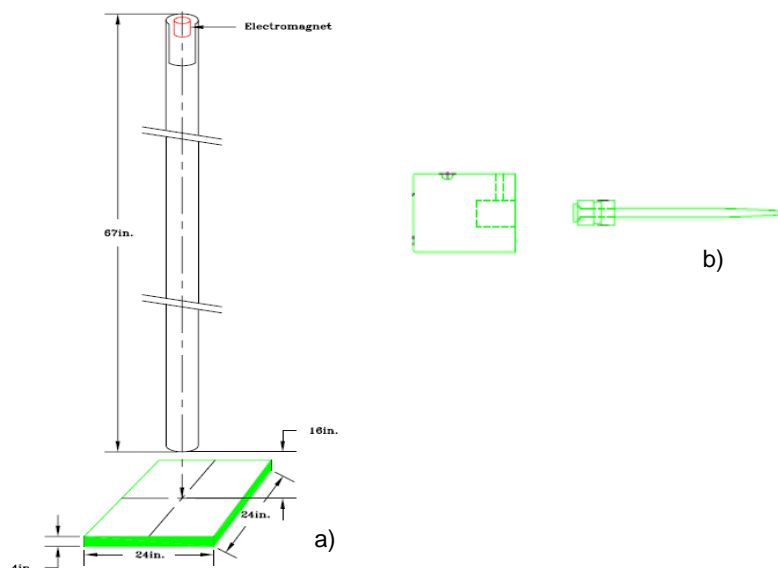


Figura 2.19 – a) - Estrutura de ensaios de armas perfurantes; b) - suporte e arma perfurante [27].

2.3. A Técnica da Barra de Hopkinson nos Ensaio de Balística

A ideia de um equipamento para ensaios de balística por impulsão electromagnética baseada numa barra de Hopkinson, destinado a avaliar o desempenho de blindagens militares sujeitas a impactos de projecteis, surgiu em 2005. Este projecto teve várias evoluções, principalmente no que se refere ao sistema de impulsão dos projecteis, uma vez que a restante estrutura e metodologia, baseada numa barra de Hopkinson, apenas estiveram sujeitas a pequenas modificações de ajuste.

2.3.1. Barra de Hopkinson e Caracterização Mecânica dos Materiais

A barra de Hopkinson é um dispositivo desenvolvido para caracterizar mecanicamente materiais a elevadas velocidades de deformação (normalmente entre 10^2 e os 10^4 s^{-1}) [28 – 36]. O modo de utilização mais conhecido da barra de Hopkinson é a designada *Split Hopkinson Bar* (Figura 2.20). Esta consiste em duas longas barras cilíndricas com o mesmo diâmetro, designadas por barra incidente e barra transmissora, e uma barra cilíndrica de menor comprimento, designada por barra de impacto ou barra projectil, normalmente impulsionada por uma arma de pressão de ar comprimido contra a barra incidente [37 – 41]. O ar é normalmente fornecido através de um reservatório de alta pressão e a pressão do disparo é controlada através de válvulas.

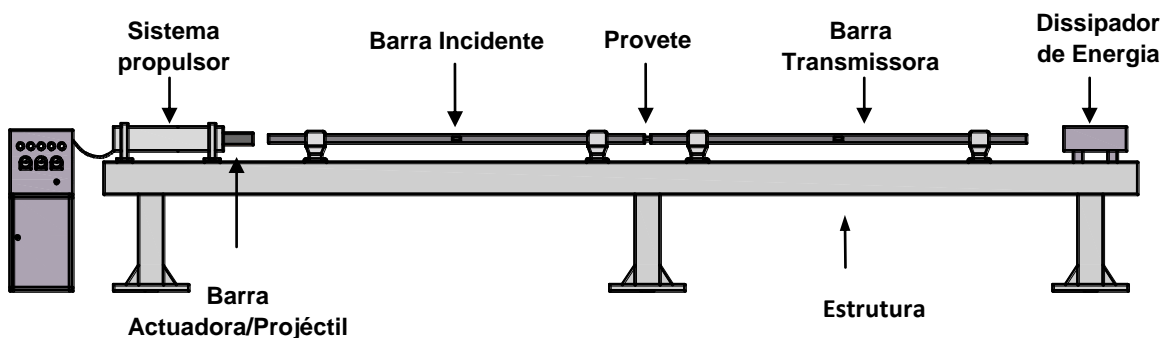


Figura 2.20 - Barra de Hopkinson.

As maiores desvantagens dos sistemas *Split Hopkinson Bar* compressivos podem ser resumidas com a necessidade de elevadas pressões de forma a atingir elevadas taxas de extensão; falta de repetibilidade da pressão do disparo e elevado ruído da operação devido à instantânea expansão do ar e da dimensão total da montagem do aparato.

A figura 2.21 apresenta um esquema simplificado do princípio de funcionamento de uma barra de Hopkinson. O ensaio consiste em disparar uma barra projectil (Figura 2.21a) de encontro a uma barra incidente. O impacto resultante provoca uma onda de pressão elástica que se propaga ao longo da barra incidente até à interface com o material a ensaiar, provocando a sua deformação. Parte dessa onda é transmitida para a barra transmissora e uma outra parte é reflectida para a barra incidente. A propagação das ondas de pressão ao longo das barras é monitorizada através da utilização de extensómetros (A e B), os quais

medem as deformações elásticas das barras. Os sinais adquiridos pelos extensómetros estão esquematicamente ilustrados na figura 2.21b. Os sinais obtidos são seguidamente amplificados e apresentados num osciloscópio. Através da manipulação matemática das medições de extensão nas barras é possível determinar a curva tensão-extensão do material [42].

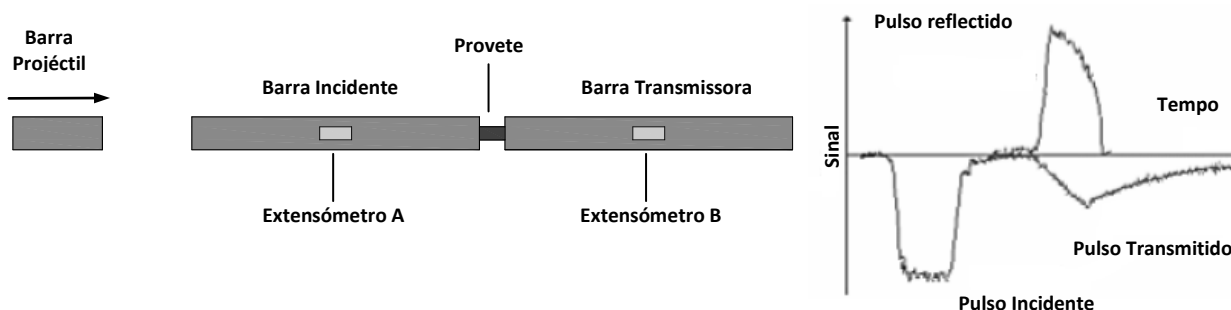


Figura 2.21 - Princípio de funcionamento de uma barra de Hopkinson: (a) Esquema simplificado do equipamento; (b) Monitorização típica dos sinais obtidos nos extensómetros.

Na verdade, a técnica experimental de Hopkinson é tradicionalmente designada por barra de Hopkinson por utilizar células de carga de elevado comprimento sem qualquer constrangimento no seu movimento axial, as quais são utilizadas para medir as ondas de pressão geradas durante o impacto [37, 43, 44]. A barra de Hopkinson modificada (maquina de ensaios de balística) que vem sendo desenvolvida é composta por quatro sistemas principais, como se pode verificar na figura 2.22, e foi concebida de forma a permitir quantificar a energia remanescente de impacto transmitida através de uma amostra de blindagem sob diferentes condições de energia de impacto. A principal diferença entre este sistema e uma barra de Hopkinson tradicional é o simples facto de a barra transmissora, a qual efectua a medição do valor das energias remanescentes, encontrar-se fixa.

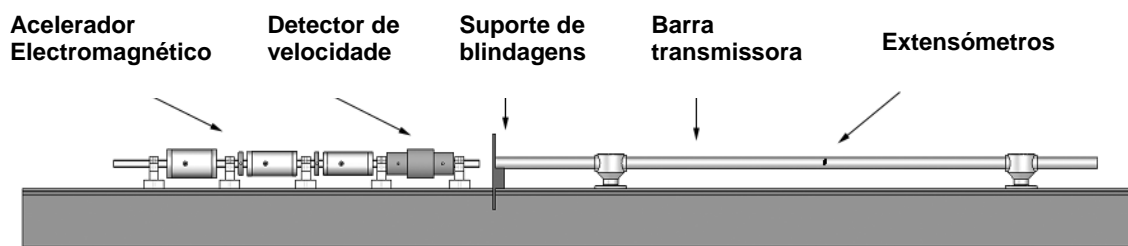


Figura 2.22 - Representação esquemática do sistema de Hopkinson, com impulsão electromagnética do projectil, implementado para a avaliação da energia remanescente de impacto transmitida através de blindagens balísticas [13].

2.3.2. Disparador Electromagnético

Nos dois primeiros anos de projecto, efectuaram-se os dois primeiros protótipos de um actuador electromagnético, ainda um pouco elementares, com o intuito de fornecer a energia necessária aos projecteis. Estes baseavam-se nos típicos actuadores de relutância magnética (Figura 2.23a) que consistem num tubo guia, em torno do qual é enrolado uma bobina de fio

condutor pela qual passa corrente eléctrica. Dentro do tubo é colocado um núcleo em material ferromagnético. A corrente que circula na bobina cria um campo magnético dentro do tubo, que acelera o núcleo. Quanto maior for o valor da corrente na bobina, maior é o campo magnético e consequentemente a aceleração do núcleo.

Os protótipos então desenvolvidos (Figura 2.23b) eram constituídos por um simples tubo de PVC envolto numa única bobina, sendo o banco de potência um pouco modesto, pois era constituído por condensadores de baixa capacidade de armazenamento o que não permitia ter disponíveis elevadas energias para a descarga, o que originava um deslocamento do núcleo ferromagnético (que se encontrava dentro do tubo de PVC) lento. Nesta altura conseguia-se ter energias de disparo na ordem dos 5 Joules.

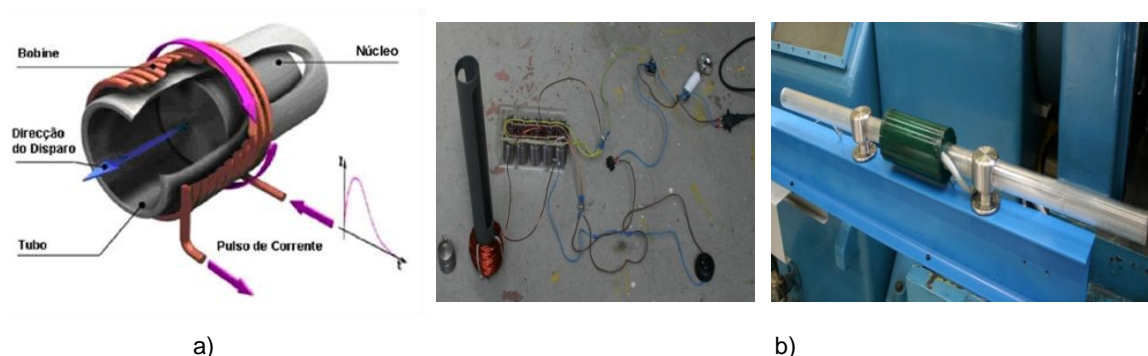


Figura 2.23 – a) - Princípio de relutância magnética [45]. b) - Primeiros Protótipos realizados [46].

No terceiro ano, e depois da realização dos primeiros protótipos, surgiu a necessidade de se efectuar um estudo da descarga dos condensadores de modo a que esta se efectuasse rapidamente, originando uma maior aceleração por parte do núcleo ferromagnético (terceiro ano de projecto). Nesta altura coloca-se em hipótese duas soluções: o controlo recorrendo à tecnologia IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) e/ou o controlo através da tecnologia de tiristores. Devido a factores monetários a segunda conjectura foi a escolhida.

Nesta altura, é ainda realizado o terceiro protótipo, contendo já três bobinas colocadas de forma sequencial envoltas num escudo magnético. As bobinas continham um comprimento de 90mm (feitas a partir de fio de cobre de 2mm) e o escudo magnético era um cilindro de aço AISI 1045 com 10 mm de espessura em torno de cada bobina. As três bobinas eram colocadas em sistemas independentes (Figura 2.24a), onde cada uma se encontrava ligada ao respectivo banco de condensadores que permitiam uma aceleração do núcleo ferromagnético (projectil) por etapas, ou seja de forma sequencial (Figura 2.24b).

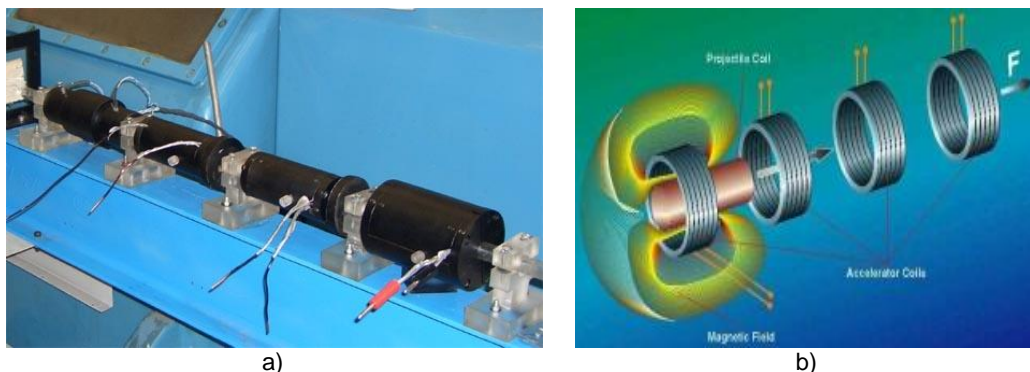


Figura 2.24 – a) - Disparador sequencial de três bobinas [13]. b) - Exemplo ilustrativo de uma descarga/disparo sequencial.

Uma vez que a aceleração do projectil era feita de forma sequencial, esta era de certa forma uma limitação, pois exigia um corte de corrente quando o projectil se encontrava sensivelmente a meio da bobina, de modo a se otimizar a velocidade de saída, tal sincronismo era necessário mas por vezes difícil de garantir. De referir ainda que o projectil na altura utilizado era semelhante em termos de dimensões a um real (projectil 5.56mm ou 9mm), mas as suas características diferentes, na medida que foram maquinados a partir de aço temperado, no qual a sua rigidez era superior ao de um projectil real.

A unidade de potência implementada (Figura 2.26a), baseava-se num simples circuito RLC, contendo quatro condensadores, dois para a primeira bobina e um para cada uma das seguintes. Estes encontravam-se ligados à rede eléctrica por meio de um transformador variável que permitia regular a tensão de carga destes. A descarga dos condensadores era efectuada por meio de tiristores, activados no caso da primeira bobina por um interruptor de pressão, e células fotoeléctricas no caso das restantes bobinas. Paralelamente ao circuito RLC, encontravam-se diodos de *free-wheeling* de modo a escoar a corrente induzida pelo *kickback* induzido, protegendo as bobinas.

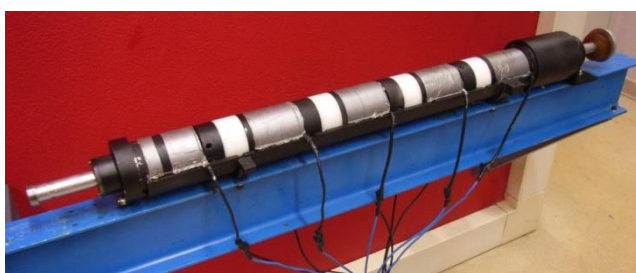
As energias de disparo associadas a este protótipo eram de 10 Joules, o que apesar de não serem suficientes para o desejado (testar blindagens), não fez deste um caso perdido, pois este veio dar um contributo muito grande para o desenvolvimento quer do protótipo seguinte, quer do presente trabalho. Com o desenvolvimento deste protótipo foram realizados estudos que permitiram determinar os comprimentos e diâmetros óptimos das bobinas.

Para determinar o melhor comprimento das bobinas recorreu-se ao programa de simulação de elementos finitos Ansys. Foi assim visualizada a variação da força exercida em função do comprimento da bobina, tendo sido perceptível um aumento de força com o comprimento, estabilizando nos 90 mm. No que diz respeito à determinação do diâmetro das bobinas os estudos revelaram que a indutância aumenta quadraticamente com o número de enrolamentos da mesma. Foram ainda identificadas as principais variáveis do projecto, como a influência da tensão na velocidade do projectil, a influência da posição inicial na velocidade de saída do projectil e a influência da massa dos projecteis na velocidade dos mesmos [13].

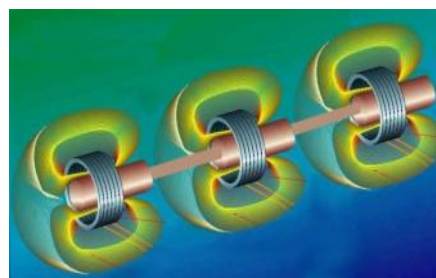
É então em 2008 que surge o quarto e último protótipo, sendo este já algo complexo, quer a nível de banco de potência, quer a nível de estrutura, destacando-se de todos os outros na medida que se conseguia efectuar um disparo simultâneo e não sequencial (Figura 2.25b).

Tratava-se então duma reconfiguração dos tradicionais actuadores de relutância magnética, na qual a combinação de inúmeros materiais (paramagnéticos, ferromagnéticos, dieléctricos, etc) em conjunto com a implementação simultânea de vários binómios bobina/núcleo ferromagnético, proporcionavam o deslocamento do actuador, com controlo da velocidade de actuação, bem como da energia disponibilizada (Figura 2.25a) [47].

Passava-se a ter um disparador que para além dos materiais já referidos, continha cinco bobinas a que a cada uma correspondia um núcleo ferromagnético. Aqui residia então uma das grandes diferenças, pois este não continha apenas um núcleo e estes encontravam-se interligados por uma barra (barra actuadora), o que fazia com que se conseguisse um disparo simultâneo. De modo a poder-se efectuar os ensaios balísticos, o projectil de 9mm ou 5,56mm encontrava-se acoplado, na extremidade dessa barra actuadora. As bobinas foram efectuadas também a partir de fio de cobre de 2mm, tendo um comprimento de 90mm e perfaziam um diâmetro externo de 40mm e interno de 23mm. O escudo magnético que as envolvia continha uma espessura de 10mm. O banco de potência instalado (Figura 2.26b) constituía-se como uma referência comparativamente aos outros realizados. Baseando-se também em circuitos RLC, este já continha dez condensadores de 450 Volts (dois ligados em paralelo a cada uma das bobinas), sendo alimentados por um transformador de 800 Volts, tendo associado a este um outro variável de modo a permitir regular a voltagem a ceder aos condensadores. Uma outra melhoria deparava-se com a activação dos tiristores (que possibilitam a descarga), sendo efectuada através de relés, que fazia com que o disparo fosse efectuado mais rapidamente.



a)



b)

Figura 2.25 – a) - Disparador Simultâneo. b) - Exemplo ilustrativo de uma descarga/disparo simultâneo.



a)



b)

Figura 2.26 – a) – Unidade de potência implementado no segundo protótipo [13].
b) - Banco de potência do último protótipo.

Com este disparador, conseguiu-se passar a ter energias na ordem dos 130 Joules. Como facilmente se pode verificar pelos valores de energia cinética dos projecteis de 9mm e 5.56mm apresentados no ponto 2.1.2, é indubitável que as energias deste disparador eram insuficientes. Além deste aspecto demonstrava uma grande inconsistência estrutural, pois a quando da utilização para grandes valores energéticos, a vibração era de tal ordem que quer as ligações do disparador, quer as ligações do mesmo à estrutura e até a própria estrutura, mostravam sinais de cedência e colapso. Esta mesma vibração ao ser sentida em toda a estrutura de Hopkinson poderia influenciar negativamente os resultados.

CAPÍTULO 3

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

O presente capítulo está estruturado de forma a permitir apresentar uma descrição dos fundamentos teóricos necessários para a realização do presente trabalho de mestrado. Começa por apresentar os fundamentos dos circuitos eléctricos e do electromagnetismo que foram utilizados no desenvolvimento do disparador electromagnético, na optimização do banco de potência e na instalação dos sensores e sistemas de aquisição de dados. O capítulo termina com uma breve introdução aos princípios de funcionamento da técnica de Hopkinson, que foram em parte utilizados para a avaliação quantitativa do desempenho das blindagens balísticas.

3.1. Fundamentos de Circuitos Eléctricos

Neste trabalho, o método de disparo electromagnético seleccionado (fundamentalmente relutância magnética) recorre à utilização de bobinas dispostas sequencialmente, promovendo uma aceleração simultânea da barra de impacto. Deste modo há a necessidade de um controlo preciso, do instante inicial de descarga.

Para que se consiga ter valores admissíveis de energia no momento do disparo são necessárias voltagens elevadas, não sendo possível utilizar directamente os valores da rede eléctrica, sendo necessário recorrer a uma fonte/banco de potência que tenha a capacidade de transformar e armazenar a energia eléctrica para posterior utilização.

De seguida é apresentada uma breve introdução aos fundamentos dos circuitos eléctricos, com especial incidência no tipo RLC. Sendo exposta uma resumida explicação de alguns princípios importantes, bem como uma pequena descrição dos componentes básicos que se podem encontrar numa fonte/banco de potência, assim como as equações características que regem a sua descarga.

3.1.1. Definições e Leis

A corrente eléctrica (i) tal como a conhecemos, não passa de uma quantidade de carga (dq) que flui através de um certo ponto num condutor, por unidade de tempo (dt) e é expressa por:

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (\text{Eq.2})$$

A tensão, por sua vez é conhecida como o trabalho realizado para deslocar uma quantidade de carga entre dois pontos com potenciais diferentes. O potencial eléctrico mede a

força que uma carga eléctrica experimenta no seio de um campo eléctrico, expressa pela lei de Coulomb, portanto a tensão é a tendência que uma carga tem de ir de um ponto para o outro. Normalmente considera-se um ponto de tensão zero e mede-se a tensão dos restantes pontos relativamente a este.

De modo a determinar o comportamento de um circuito utilizam-se as chamadas leis de Kirchhoff, duas leis que relacionam tensões e intensidades num circuito. Para as tensões, a lei de Kirchhoff (lei das malhas), diz-nos que “A soma das tensões ao longo de uma malha fechada num circuito é nula”. No que diz respeito às correntes (lei dos nós), esta diz que “A soma das correntes incidentes num ponto (nó de circuito) é zero” (conservação da carga – a soma das correntes que entram num nó é igual à soma das correntes que saem desse nó) [48]. Uma outra lei importante para a compreensão dos circuitos é a lei de Ohm, afirmando esta, que a corrente através de um condutor metálico é directamente proporcional à tensão aplicada aos seus terminais.

3.1.2. Circuito RLC

Um circuito *RLC* é constituído por uma resistência (*R*), uma bobina com uma dada indutância (*L*) e um condensador de capacidade (*C*) (Figura 3.1a).

A resistência é um dos elementos mais simples dos circuitos eléctricos e tem como função fornecer uma resistência específica. Para uma dada diferença de potencial, quanto maior for a resistência ao fluxo de carga, menor será a corrente. A resistência de um condutor, determina-se aplicando uma diferença de potencial (*V*) entre dois pontos e medindo a corrente *i*. A resistência (*R*) é então dada pela Eq.3 e a potência dissipada nesta é dada pela Eq. 4.

$$R = \frac{V}{i} \quad (\text{Eq.3})$$

$$P = V \times i \quad (\text{Eq.4})$$

Um condensador é qualquer disposição de condutores utilizada para armazenar carga eléctrica. Além de carga, também armazena energia potencial. A relação (*I*, *V*) é definida pela Eq. 5 e a energia armazenada é dada pela Eq. 6. Referir que no caso de haver mais do que um condensador no circuito, a energia armazenada, é superior no caso destes se encontrarem em série, pois em paralelo temos um aumento da capacitância (*C*) e uma diminuição da tensão, ao contrário de em série que temos um aumento da tensão e uma diminuição da capacitância. Da Eq. 5 pode ainda surgir a equação de estado, que refere que um condensador com uma capacidade/capacitância (*C*) e *V* (volt) aos seus terminais armazena uma carga de *Q* (Coulomb), resultando assim a definição de um condensador em função da carga (Eq. 7). No condensador a potência associada à corrente que o percorre não é dissipada (como na resistência) mas antes armazenada como uma fonte de energia que é devolvida quando o condensador é descarregado.

$$I = C \frac{dV}{dt} \quad (\text{Eq.5})$$

$$E = \frac{1}{2} CV^2 \quad (\text{Eq.6})$$

$$Q = CV \quad (\text{Eq.7})$$

No que diz respeito ao banco de potência utilizado neste presente trabalho, é importante ter em conta como um condensador carrega, bem como as expressões associadas a esse carregamento. Assim, deve-se em primeiro lugar pensar num circuito RC (resistência e condensador) como o da figura 3.1b, onde existe também uma fonte de tensão que fornece a energia necessária para o estabelecimento de uma corrente no circuito.

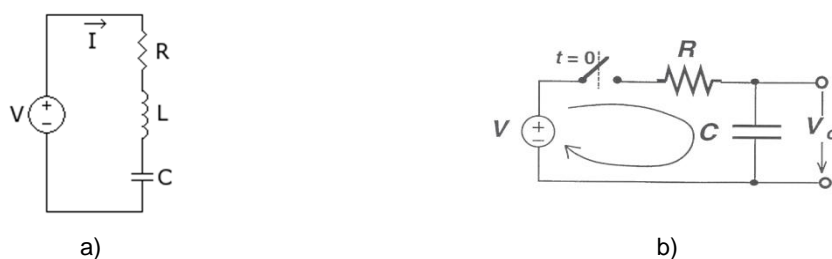


Figura 3.1 – Circuitos base: a) Esquema de ligações de um circuito RLC [49]; b) Circuito RC com fonte de tensão [50].

Suponha-se então que no instante $t = 0$ o interruptor se fecha e que a tensão inicial do condensador é nula. Utilizando as equações do condensador e da resistência, bem como a lei de Kirchhoff das tensões, obtém-se a equação diferencial 8. A resolução desta equação conduz a Eq.9. Efectuando uma pequena manipulação das equações anteriores chega-se à Eq.10 que traduz a variação de corrente, durante o tempo, aquando do carregamento de um condensador.

$$I = C \frac{dV_0}{dt} = \frac{V - V_0}{R} \quad (\text{Eq.8})$$

$$V_0 = V - Ve^{\frac{-t}{RC}} \quad (\text{Eq.9})$$

$$I = \frac{V}{R} e^{\frac{-t}{RC}} \quad (\text{Eq.10})$$

Graficamente, a evolução da tensão num condensador inicialmente descarregado é representada por uma característica exponencial que tende para a tensão máxima (determinada pela fonte de tensão no circuito), quando t tende para infinito (Figura 3.2). A “velocidade” de carga do condensador é determinada por um parâmetro designado constante de tempo do circuito, função de R e C .

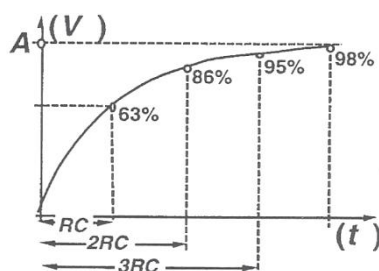
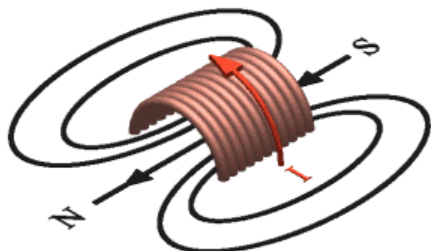


Figura 3.2 - Evolução da tensão num condensador inicialmente descarregado [50].

Uma bobina consiste num fio condutor, enrolado numa espiral helicoidal com muitas voltas. A passagem de uma corrente nesse fio dará lugar a um campo magnético no interior das espiras, transformando assim a energia eléctrica (Figura 3.4). A sua grandeza característica é a indutância L e a equação característica é dada pela Eq. 11.



$$V = L \frac{dI}{dt} \quad (\text{Eq. 11})$$

Figura 3.3 - Produção de um campo magnético, através da passagem de uma corrente I , numa bobina.

3.1.3. Descarga do RCL

Tal como já foi referido, para obter os níveis de energia de impacto necessários, é imprescindível a criação de uma força magnética induzida por correntes eléctricas de grande intensidade, na ordem dos milhares de Ampère. Este valor é muito superior aos valores máximos tolerados por interruptores comuns, da ordem dos 10 A ou até dos 50 A de um comum interruptor de potência. Surge assim a necessidade de uma outra solução para iniciar a descarga RLC . Existe deste modo a necessidade de se optar por um sistema de interruptores de estado sólido que permitam a passagem de correntes elevadas e simultaneamente com capacidade para ligar rapidamente o circuito. No caso do banco de potencia desenvolvido neste trabalho, a descarga dos condensadores está a cargo de tiristor's, os quais funcionam como um diodo activado por uma *gate*. Quando na *gate* entram uma voltagem e intensidades superiores aos valores tabelados, o tiristor fecha o circuito, descarregando os condensadores. Caso os condensadores ainda tenham carga quando a *gate* desactiva, o tiristor continua a conduzir mesmo assim, pelo que só é possível controlar a sua activação.

Para compreender o funcionamento da descarga de um circuito RLC , é necessário em primeiro lugar perceber alguns parâmetros fundamentais. O primeiro a ser definido é a frequência de ressonância ou frequência natural do circuito. A ressonância dá-se quando a impedância¹¹ complexa do sistema LC é zero, ou seja, a soma das impedâncias da bobina e do condensador são zero. Para uma frequência angular complexa s temos então as Eq. 12 e 13 [51]. Resolvendo então em ordem a s obtém-se a Eq. 14. A seguinte grandeza fundamental a ser definida é a constante de amortecimento. Esta reflecte a velocidade com que a resposta do circuito decai no tempo. Para um circuito RLC em série esta grandeza toma o valor dado pela Eq. 15.

$$Z_c = \frac{1}{Cs} \quad (\text{Eq.12})$$

¹¹ **Impedância eléctrica** ou simplesmente **Impedância** é a relação entre o valor médio da diferença de potencial entre dois pontos de circuito em consideração, e o valor médio da corrente resultante no circuito.

$$Z_L = L s \quad (\text{Eq. 13})$$

$$s = \pm j \frac{1}{\sqrt{LC}} = \pm j \omega_0 \Rightarrow \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (\text{Eq. 14})$$

$$\zeta = \frac{R}{2L} \quad (\text{Eq. 15})$$

Para calcular a resposta do circuito utiliza-se a lei das voltagens de Kirchoff (lei das malhas) para a totalidade do circuito, dada pela Eq. 16. Utilizando agora as equações características de cada componente para resolver em ordem às intensidades tem-se, após derivação no tempo, a Eq. 17.

$$v_R + v_L + v_C = v \quad (\text{Eq. 16})$$

$$\frac{d^2 i}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{di}{dt} + \frac{1}{LC} i(t) = \frac{1}{L} \frac{dv}{dt} \quad (\text{Eq. 17})$$

Utilizam-se finalmente as grandezas anteriormente definidas para obter a Eq. 18. Esta equação, dependendo da voltagem induzida pela fonte, pode ser de difícil resolução. No entanto, se esta voltagem não existir, a sua resolução fica grandemente simplificada. É na resolução deste caso em particular, chamado *Zero Input Response*, que se encontra a solução da descarga do circuito instalado no presente projecto. A solução é simples de obter, pois tratando-se de uma equação homogênea de segundo grau pode ser obtida resolvendo o polinómio característico (Eq. 19), com zeros dados pela Eq. 20.

$$i'' + 2\zeta i' + \omega_0^2 i = \frac{1}{L} \frac{dv}{dt} \quad (\text{Eq. 18})$$

$$\lambda^2 + 2\zeta\lambda + \omega_0^2 = 0 \quad (\text{Eq. 19})$$

$$\lambda = -\zeta \pm \sqrt{\zeta^2 - \omega_0^2} \quad (\text{Eq. 20})$$

Existem agora três casos possíveis (Figura 3.4), variando a resposta do sistema de acordo com a relação entre ζ e ω [45]: 1) Se $\zeta > \omega$ ambos os zeros do polinómio característico são reais negativos, dizendo-se que existe uma situação de sobre-amortecimento; 2) Se $\zeta = \omega$ ambos os zeros do polinómio característico são dois números reais negativos, dizendo-se que existe uma situação criticamente amortecida; 3) O último caso dá-se quando $\zeta < \omega$, o que dá duas raízes conjugadas complexas como zeros ($\lambda_1 = -\zeta \pm i\omega_c$). Utilizou-se por motivos de simplificação uma grandeza derivada, a frequência amortecida, com valor dado por $\omega_c = \sqrt{\omega^2 - \zeta^2}$, após simplificação obtêm-se uma solução sub-amortecida.

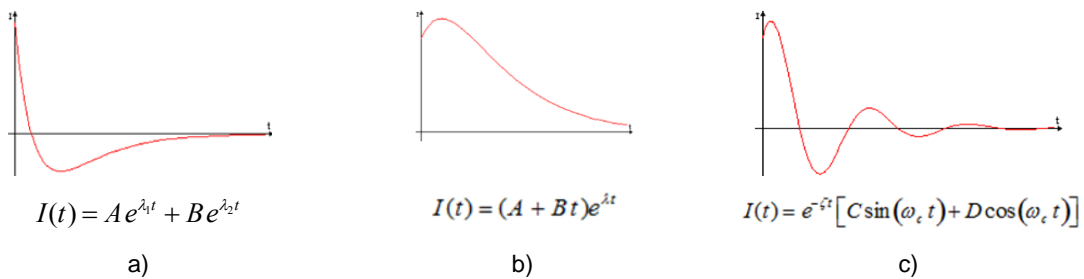


Figura 3.4 – Descarga de um circuito RLC; a) Descarga RLC sobre-amortecida; b) Resposta criticamente amortecida; c) Resposta sub-amortecida.

É possível obter uma equação geral por manipulação destes resultados, válida em todas as situações de amortecimento já mencionadas. Nessa equação apenas são variáveis a resistência, a indutância, a capacidade e a tensão inicial de carga dos condensadores no início da descarga. A intensidade que percorre a bobina ao longo da descarga é então dada pela Eq. 21, com as constantes de amortecimento e frequência dadas pelas equações 22 e 23, respectivamente.

$$I(t) = \frac{V}{\beta L} e^{-\alpha t} \sin(\beta t) \quad (\text{Eq. 21})$$

$$\alpha = \frac{R}{2L} \quad (\text{Eq. 22})$$

$$\beta = \sqrt{\frac{1}{LC} - \alpha^2} \quad (\text{Eq. 23})$$

3.2. Fundamentos de Electromagnetismo

Nesta tese de mestrado, tal como já foi referido, utilizou-se para promover a aceleração da barra de impacto/projétil, o princípio de relutância magnética. Deste modo, será necessária uma breve explicação de algumas noções de electromagnetismo, bem como o próprio conceito de relutância magnética.

3.2.1. Lei de Biot–Savart

Quando uma dada corrente eléctrica passa por um fio, o movimento de cargas cria um campo magnético em redor desse mesmo. Deste modo a lei de Biot-Savart estabelece a equação (Eq. 24, 25) do campo de indução magnética B produzida num ponto P por um fio de corrente I (Figura 3.5) [52, 53]. Outra grandeza importante, conhecida como campo magnético (H) retira o efeito da permeabilidade dos materiais, resultando na Eq. 26. A nomenclatura empregue torna-se confusa, pelo que B passará a ser referido como densidade de fluxo magnético e H será designado “campo magnético”. Se todas as correntes no sistema forem conhecidas é então possível por integração calcular o campo magnético em qualquer ponto do espaço.

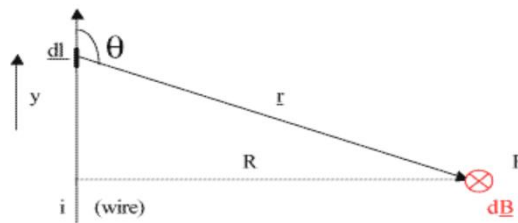


Figura 3.5 - Campo criado por um fio rectilíneo.

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 \mu_r}{4\pi} \frac{I d\vec{l} \times \hat{r}}{r^2} \quad (\text{Eq. 24})$$

$$d\vec{H} = \frac{1}{4\pi} \frac{I d\vec{l} \times \hat{r}}{r^2} \quad (\text{Eq. 25})$$

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H} \quad (\text{Eq. 26})$$

3.2.2. Lei de Ampère

Os campos magnéticos são devidos a correntes, sendo a relação entre H e I , expressa pela lei de Ampère (Eq. 27), que afirma que o integral de H ao longo de qualquer curva fechada relaciona-se com a corrente interceptada por uma superfície arbitrária limitada pela curva. As linhas de campo magnético fecham-se sobre si mesmas, com uma curvatura dada pela Eq. 27, ou seja, dependendo da corrente eléctrica. Esta lei ganha especial importância no cálculo do campo magnético de uma bobina. Como as linhas de campo no exterior da bobina se distribuem por uma região infinita de espaço, a sua densidade tende para zero e, portanto, o campo magnético é quase zero. Mas no que diz respeito ao campo no interior, este é constante devido à soma das contribuições de campo de cada uma das espiras condutoras de corrente, sendo calculado através da integração da Eq. 27, ao longo de um percurso rectangular (Figura 3.6). Assim para uma bobina com N voltas obtém-se a Eq. 28.

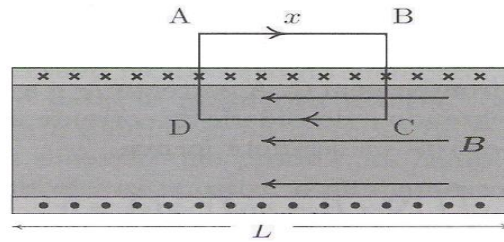


Figura 3.6 - Lei de Ampère aplicada a uma bobina [54].

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I \quad (\text{Eq. 27})$$

$$|\vec{B}|L = \mu Ni \Leftrightarrow B = \mu i \frac{N}{L} \quad (\text{Eq. 28})$$

3.2.3. Princípio de relutância magnética

Como referido anteriormente, aquando da passagem de uma corrente eléctrica por uma bobina, cria-se um campo magnético em redor desta. Quando um núcleo ferromagnético se aproxima do campo criado pela bobina é magnetizado por este, adquirindo uma magnetização inversa à do campo da bobina. Este pólo induzido é atraído para o pólo da bobina, resultando numa aceleração do núcleo, sempre no sentido do centro da bobina, independentemente do sentido da corrente. Caso o sentido da corrente fosse invertido a aceleração teria a mesma direcção, pois embora os pólos fossem inversos, também os induzidos nos núcleos o seriam. Quando um núcleo é colocado numa dada posição de uma

bobina percorrida por uma corrente eléctrica esta sofre uma força (Figura 3.7a) com valor dado pela Eq. 29. A tendência do núcleo é ser atraído para as maiores densidades de fluxo. A força pode ser aumentada através do acréscimo do número de espiras, da intensidade que as percorre ou ampliando o gradiente do fluxo. Uma forma de aumentar o gradiente de fluxo é utilizar um escudo magnético (Figura 3.7b), isto é, uma capa de material de elevada permeabilidade magnética que conduz as linhas de fluxo magnético, concentrando-as, o que aumenta a força resultante no projectil. A impulsão electromagnética pode ser implementada através de vários métodos, os quais recorrem a diferentes princípios do electromagnetismo, que estão essencialmente dependentes das propriedades do material e da geometria do projectil a ser acelerado.

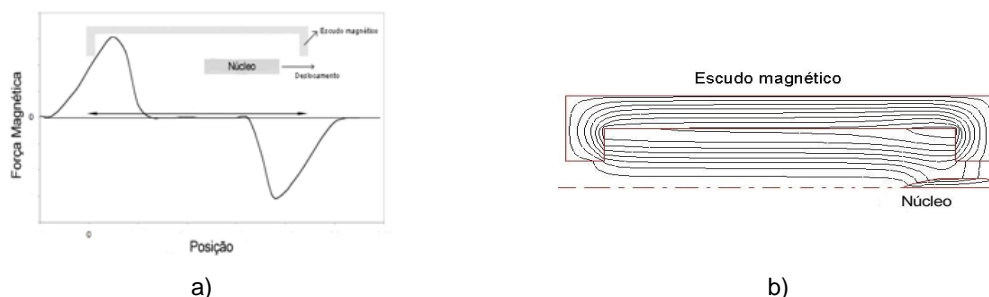


Figura 3.7 – a) - Esquema representativo do sentido das forças magnéticas no interior da bobina aquando da aproximação de um núcleo ferromagnético. b) - Esquema da concentração das linhas de fluxo magnético por meio de um escudo magnético.

$$F = \frac{1}{2} NI \frac{d\phi}{dx} \quad (\text{Eq. 29})$$

3.2.4. O Campo Magnético e os materiais

As partículas elementares, e em particular os electrões, têm um momento magnético intrínseco próprio de cada tipo de partícula, chamado *spin*, bem como um momento magnético orbital, devido ao seu movimento no átomo. Os prótons e neutrões no núcleo também têm *spin*, mas o momento magnético deles é muito menor do que o momento dos electrões. Uma partícula com momento magnético comporta-se como um pequeno íman orientado na direcção do momento.

Dentro de um campo de indução magnética externo, os momentos magnéticos dos átomos ou moléculas tendem a alinhar-se na direcção do campo. No entanto, o campo também induz correntes, na direcção que produz um campo induzido oposto ao campo externo. Existem, assim, dois efeitos opostos: o alinhamento dos momentos atómicos ou moleculares na direcção do campo que determina uma força atractiva na direcção da fonte externa do campo; por outro lado, os momentos induzidos são opostos ao campo externo, e determinam uma força repulsiva. Dependendo do valor dos momentos intrínsecos do material e do módulo do campo, um ou outro efeito pode dominar.

Os electrões têm uma tendência para se agruparem em pares com *spins* orientados em direcções opostas. Cada par tem um momento magnético nulo; consequentemente, a maior parte dos átomos com número par de electrões têm um *spin* total nulo e só apresentam o primeiro tipo de resposta ao campo magnético: campo de indução magnética induzido, oposto ao campo externo que conduz a uma repulsão num campo externo. Este tipo de comportamento é chamado **diamagnetismo**; os materiais diamagnéticos identificam-se por serem ligeiramente repelidos por campos magnéticos fortes, já que o campo induzido costuma ser muito fraco. A maior parte das substâncias são diamagnéticas como por exemplo a água, o vidro, os plásticos e muitos compostos orgânicos.

Alguns elementos como o alumínio, o sódio, o oxigénio e a platina, possuem um momento magnético intrínseco. Um campo de indução magnética produz os dois fenómenos de momentos magnéticos induzidos e alinhamento dos momentos magnéticos intrínsecos na direcção do campo externo. Como o efeito diamagnético é bastante fraco, o efeito dominante é o alinhamento dos momentos magnéticos na direcção do campo externo, e uma força magnética atractiva: **paramagnetismo**.

O alinhamento dos momentos magnéticos nos materiais paramagnéticos não é um efeito forte, pois é contrariado pelas vibrações térmicas dos átomos. Alguns materiais chamados **ferromagnéticos** apresentam momentos magnéticos muito mais elevados que podem ser alinhados de uma forma mais eficaz, dando origem a campos intrínsecos elevados que persistem mesmo depois de desaparecer o campo externo; tais como os ímanes naturais que são constituídos por este tipo de materiais. Nos materiais ferromagnéticos, os átomos estão distribuídos numa forma que favorece o seu agrupamento em domínios magnéticos: pequenas regiões microscópicas formadas por vários átomos com momentos magnéticos na mesma direcção.

3.3. Barra de Hopkinson

Como referido anteriormente, o aparelho que permite o ensaio de materiais a elevadas velocidades de deformação de forma mais simples e fiável é a Barra de Hopkinson. Como tal, foi este o aparelho escolhido para se testar materiais nestas condições. Esta técnica baseia-se na resolução da equação de Pochhammer e Love, a qual consistia na determinação da frequência da barra para a velocidade das ondas longitudinais nas barras cilíndricas.

Os sinais obtidos são depois amplificados e apresentados num osciloscópio e num computador. Através de manipulações matemáticas destas medições de extensão nas barras, será possível então calcular a tensão (σ), a extensão (ϵ) e a velocidade de deformação ($\dot{\epsilon}$).

3.3.1. Tratamento dos Sinais Obtidos

Depois de adquiridos, os dados são visualizados no osciloscópio e gravados num computador. Uma vez neste, estes têm de ser tratados antes da obtenção da relação tensão-extensão do provete. Esta manipulação é efectuada recorrendo a ambientes de programação,

como o *MATLAB*, ou outros. A sequência normal a seguir no tratamento dos sinais obtidos é a seguinte [55]:

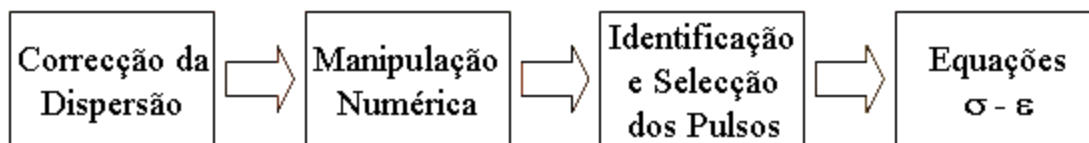


Figura 3.8 – Procedimento a seguir no tratamento de dados.

Onde a manipulação numérica não é mais que a execução de um código numérico que identifique de forma sistemática as variações dos sinais ao longo do tempo. Neste procedimento convém realçar o primeiro ponto, uma vez que devido à natureza das barras de pressão, os sinais adquiridos nas mesmas são corrompidos. Esta anomalia verifica-se quando as ondas de pressão se propagam ao longo das barras, não podendo ser desprezada uma vez que os dados sobre o provete são recolhidos nestas. Ou seja, a dispersão afectará os sinais obtidos da onda reflectida, conforme ilustrado na figura 3.9.

Assim, conclui-se que as propriedades da dispersão nas barras têm de ser conhecidas, para ser possível prever como será a onda de pressão na interface barra/provete, e não apenas no local onde os extensómetros se encontram.

A dispersão pode ser definida como sendo o resultado da dependência da velocidade da propagação das ondas na barra com a frequência e com o comprimento de onda, o que distorce a onda de pressão enquanto esta se propaga. Convém referir que se verificou que para comprimentos de onda da ordem do diâmetro das barras de pressão, as ondas longitudinais são dispersivas. A natureza dispersiva de barras foi apontada pela primeira vez por *Pochhammer* em 1876. Mais tarde foi *Love* quem desenvolveu a equação da dependência da onda de pressão com a frequência, em 1944.

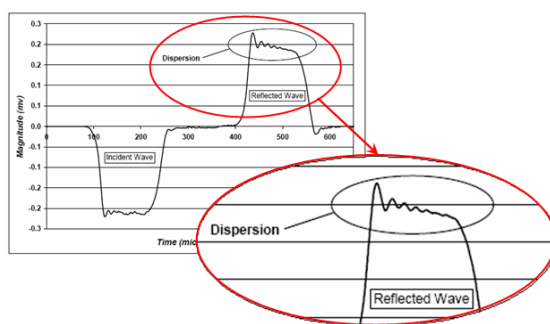


Figura 3.9 - Verificação da dispersão na onda reflectida.

Embora as equações da Barra de Hopkinson apenas funcionem admitindo não haver dispersão, a verdade é que ela existe. Como tal, será preciso encontrar um método para que, quando os dados forem processados numericamente, os efeitos da dispersão não sejam

sentidos. Estes métodos podem ser teóricos e/ou experimentais. Um dos métodos existentes é o que se encontra descrito de seguida.

Para prever como são os pulsos de extensão na interface barra/provete a partir de sinais obtidos a meio da barra são precisas manipulações nos dados adquiridos. A manipulação tem de ser feita convertendo os dados no domínio do tempo para o domínio da frequência, onde é aplicada a correcção a partir de uma *Transformada de Fourier Corrigida* (Eq. 30) para cada pulso de extensão. Após esta manipulação os dados, já corrigidos, são convertidos novamente para o domínio do tempo.

A Eq. 30 representa a forma geral da Transformada de *Fourier* [55].

$$F(t) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [A_n \cos(2\pi f \cdot nt) + B_n \sin(2\pi f \cdot nt)] \quad (\text{Eq. 30})$$

Onde as variáveis N , f , n e t são, respectivamente, o número total de pontos adquiridos, a resolução da frequência, o índice temporal, e o tempo. As constantes A_n e B_n são, respectivamente, as magnitudes da componente real e imaginária.

Para corrigir a dispersão cada componente do espectro terá de sofrer uma mudança de fase para compensar a variação da velocidade da onda. Os efeitos da dispersão podem então ser removidos através de um ajustamento da Eq. 31 [55].

$$F_{\text{corrigido}}(t) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [A_n \cos(2\pi f \cdot nt + \phi) + B_n \sin(2\pi f \cdot nt + \phi)] \quad (\text{Eq. 31})$$

$$\phi = \phi_0 - \phi_n = 2\pi f \cdot n \left(\frac{1}{C_0} - \frac{1}{C_n} \right) y \quad (\text{Eq. 32})$$

Onde C_0 é a velocidade de uma onda de comprimento de onda infinito, C_n é a velocidade da onda para cada frequência em particular, e y é uma constante representativa da distância que a onda percorre antes de ser adquirida.

O parâmetro C_n da Eq. 32 pode ser obtido experimentalmente para cada barra, ou utilizando propriedades tabeladas para barras com propriedades comuns.

Para encontrar um valor de C_n através de ensaios experimentais, será necessário recorrer inicialmente a alguma manipulação matemática, reescrevendo a Eq. 32 com o parâmetro C_n em evidência [55]:

$$C_n = \frac{2\pi \cdot n\omega \cdot y \cdot C_0}{2\pi \cdot n\omega \cdot y - C_0\phi} \quad (\text{Eq. 33})$$

Enquanto as constantes y e C_0 podem ser encontradas de forma relativamente fácil, a determinação da fase dispersiva ϕ requer a execução de dois ensaios experimentais, descritos de seguida, com o objectivo de conhecer a natureza dispersiva da barra incidente. Para conhecer a natureza da barra transmissora será necessário repetir os dois testes com as barras trocadas.

O primeiro teste consiste em fazer incidir a barra projectil directamente na barra transmissora, procedendo à aquisição da extensão da barra.

O segundo ensaio consiste em fazer incidir a barra projectil na barra incidente, estando esta última em contacto directo com a barra transmissora. Mais uma vez a extensão é medida na barra transmissora.

No primeiro ensaio, o pulso de tensão dispersa ao longo da distância Y_1 , antes da aquisição. No segundo ensaio, o pulso de tensão dispersa ao longo de Y_1 mais o comprimento da barra incidente, Y_2 , ou seja $Y_1 + Y_2$. A diferença da fase entre as duas aquisições é igual à fase dispersiva ϕ ao longo da distância $[(Y_1 + Y_2) - Y_1 = Y_2]$, ou seja, ao longo da barra incidente. Substituindo este valor na Eq. 33, torna-se possível calcular a velocidade da onda de pressão na barra incidente, para cada frequência.

3.3.2. Equações da Barra de Hopkinson

Na Barra de Hopkinson convencional, o comportamento do material do provete é determinado pela diferença de velocidades nas suas interfaces (V_1 e V_2 na Figura 3.10).

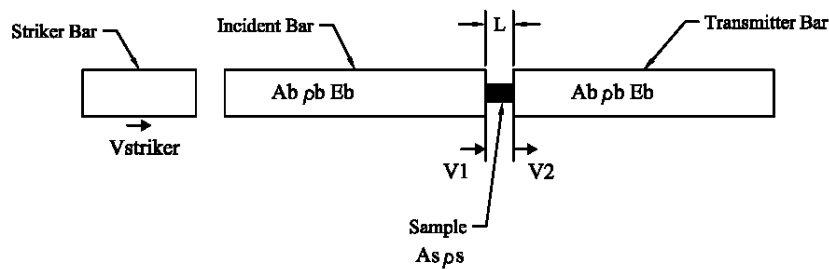


Figura 3.10 – Esquema teórico do funcionamento da Barra de Hopkinson [56].

Enquanto o pulso elástico proveniente da barra incidente deforma o provete, de comprimento L , a distância entre as barras incidente e transmissora diminui, uma vez que $V_1 > V_2$. Esta deformação ocorre durante um determinado período de tempo, proporcionando o cálculo da velocidade de deformação a partir da Eq. 34 [56].

$$\frac{d\varepsilon_s}{dt} = \frac{V_1 - V_2}{L_s} \quad (\text{Eq. 34})$$

Contudo, a medição das velocidades nas extremidades das barras é um processo complicado. Assim, em vez de realizarem estas medições, recorre-se antes a um método teórico, baseado na propagação das ondas de pressão elásticas em sólidos, neste caso nas barras incidente e transmissora.

O método teórico referido baseia-se na velocidade do som no material das barras de pressão. Esta velocidade é calculada a partir da Eq. 35 [56].

$$C_0 = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (\text{Eq. 35})$$

Onde C_0 é a velocidade do som, E é o módulo de *Young* e ρ é a densidade do material da barra. As ondas de pressão longitudinais propagam-se ao longo de um meio elástico a esta velocidade.

Para ser possível calcular a tensão, a extensão e a velocidade de deformação do provete, é necessário recorrer inicialmente à extensão incidente da barra $\varepsilon_I(t)$, à extensão reflectida da barra $\varepsilon_R(t)$, e à extensão transmitida da barra $\varepsilon_T(t)$.

As velocidades das extremidades das barras V_I e V_2 podem agora ser relacionadas com a extensão [56]:

$$V_I = C_0 \varepsilon_I \quad \text{para } (t=0) \quad (\text{Eq. 36})$$

$$V_2 = C_0 \varepsilon_T \quad (\text{Eq. 37})$$

Para $t>0$ as ondas incidente e reflectida ficam sobrepostas pelo que a velocidade fica reduzida, tornando-se V_I igual a [56]:

$$V_I = C_0 (\varepsilon_I - \varepsilon_R) \quad (\text{Eq. 38})$$

Combinando as equações 34, 37 e 38, a velocidade de deformação fica igual a [56]:

$$\dot{\varepsilon}_s(t) = \frac{C_0}{L_s} (\varepsilon_I - \varepsilon_R - \varepsilon_T) \quad (\text{Eq. 39})$$

onde L_s é o comprimento inicial do provete. A Eq. 39 só é válida se as duas barras de pressão forem feitas do mesmo material.

Por outro lado, a tensão no provete pode ser obtida a partir da Eq. 40 [56].

$$\sigma_s = \frac{F_1(t) + F_2(t)}{2A_s} \quad (\text{Eq. 40})$$

Onde F_1 e F_2 são as forças aplicadas às extremidades do provete pelas barras de pressão, e A_s é a área da secção do provete. Estas forças podem agora ser relacionadas com as extensões das barras pelas equações 41 e 42 [56].

$$F_1 = A_b E_b (\varepsilon_I + \varepsilon_R) \quad (\text{Eq. 41})$$

$$F_2 = A_b E_b (\varepsilon_T) \quad (\text{Eq. 42})$$

Pelo que a tensão virá igual a [56]:

$$\sigma_s = \frac{A_b E_b}{2A_s} (\varepsilon_I + \varepsilon_R + \varepsilon_T) \quad (\text{Eq. 43})$$

onde A_b e E_b são, respectivamente, a área da secção e o módulo de *Young* das barras de pressão.

Para que o sistema esteja em equilíbrio, terão ainda que se verificar as seguintes condições: $F_1 = F_2$ e $\varepsilon_I + \varepsilon_R = \varepsilon_T$. Simplificando as equações anteriores chega-se ao resultado pretendido [56].

$$\sigma_s = E_b \frac{A_b}{A_s} \varepsilon_T \quad (\text{Eq. 44})$$

$$\dot{\varepsilon}_s = -2 \frac{C_0}{L_s} \varepsilon_R \quad (\text{Eq. 45})$$

$$\varepsilon_s = -2 \frac{C_0}{L_s} \int_0^t \varepsilon_R dt \quad (\text{Eq. 46})$$

Onde σ_s é a tensão, ε_s a extensão e $\dot{\varepsilon}$ a velocidade de deformação do provete.

Contudo, segundo Davies, para que as equações da Barra de Hopkinson (44, 45 e 46) sejam válidas, existem algumas afirmações que têm de ser satisfeitas [56]:

- As barras têm que permanecer em regime elástico durante todo o ensaio;
 - Não ocorre atenuação ou dispersão;
 - A onda de pressão é uniforme ao longo da secção transversal da barra;
- O provete permanece em equilíbrio ao longo do ensaio

CAPÍTULO 4

DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

A quantificação do desempenho de uma blindagem balística, nomeadamente do valor de energia remanescente transmitida à pessoa ou ao objecto a proteger, é uma tarefa difícil pois combina a realização de ensaios destrutivos numa zona localizada da blindagem com a necessidade de monitorizar a evolução de aspectos físicos numa fracção de tempo reduzida. Aspectos como a monitorização da acção mecânica do projectil sobre a blindagem ou da evolução da energia cinética do projectil, ou mesmo a realização de ensaios em condições laboratoriais controladas e seguras são condições que concorrem para a necessidade de desenvolver uma bancada de ensaios específica.

Este capítulo apresenta resumidamente o desenvolvimento experimental necessário para permitir a realização dos ensaios de avaliação balística em condições laboratoriais controladas. Começa por apresentar brevemente o projecto da bancada de ensaios, para de seguida consolidar o desenvolvimento dos diferentes sistemas constituintes desta bancada. No final do capítulo são apresentados os materiais utilizados na investigação e é elaborado um plano de ensaios adequado a uma avaliação compreensiva da influência dos principais parâmetros do tiro no desempenho das blindagens balísticas.

4.1. Conceito da Bancada de Ensaios

A bancada de ensaios desenvolvida na presente tese baseia-se numa técnica modificada do domínio da caracterização do comportamento mecânico de materiais, a barra de Hopkinson, onde a barra incidente é substituída por um projectil. Embora o projectil em aplicações balísticas seja geralmente impulsionado pela queima da pólvora, no presente caso, por questões de segurança e para permitir a realização em laboratório foi escolhida a impulsão electromagnética (ausência de ruído, clarão e fumos; possibilidade de disparar diferentes calibres). Condições materiais direccionaram a utilização de disparo electromagnético simultâneo ao invés de disparo progressivo. Não obstante, as condições de energia cinética do projectil são idênticas às encontradas nas situações reais de tiro.

O desenvolvimento da bancada de ensaios foi estruturado em 5 fases, em função do número de sistemas constituintes; Começa-se por apresentar o desenvolvimento dos elementos estruturais que servem de suporte aos diversos sistemas que integram a bancada de ensaios, seguidamente apresenta-se o desenvolvimento do disparador electromagnético e do banco de potência, e a instalação de um sistema para controlo e monitorização dos ensaios.

4.2. Elementos estruturais

A bancada de ensaios balísticos consiste numa barra de Hopkinson modificada, pelo que existe semelhança nos elementos estruturais que são necessários para o seu funcionamento. De referir que a presente bancada de ensaios se encontra dividida em duas partes.

A primeira parte constituída por: a) estrutura principal do disparador (serve de apoio e fixação ao disparador); b) estrutura secundária do disparador (dá uma maior estabilidade, rigidez e altura ao disparador, funcionando ainda como armazém do banco de potência).

A segunda parte é onde estão instaladas as barras de Hopkinson e é onde se realizam os ensaios de balística propriamente ditos, sendo designada por estrutura principal do aparato (c). Nesta estrutura estão montados os seguintes sistemas: d) barra incidente (que têm acoplado o projectil de calibre 9 mm ou 5.56 mm), e) chumaceiras das barras e os respectivos grampos de fixação, f) a barra transmissora (com extensómetros para leitura das deformações), g) o suporte para as amostras de blindagens, h) o respectivo dispositivo de fixação e i) o suporte, o alvo e o sensor de deslocamento. O projecto global destes diferentes sistemas e a respectiva integração na bancada de ensaios pode ser observado na figura 4.1.

O dimensionamento dos elementos estruturais teve como principais critérios uma elevada rigidez e massa de forma a permitir resistir aos elevados carregamentos que se verificam durante os ensaios, assim como, minimizar a amplitude das vibrações ao longo da sua estrutura. De facto este último aspecto, com forte influência na qualidade dos resultados finais, foi igualmente assegurado através da utilização de uma estrutura bipartida, tal como referido anteriormente; Deste modo, as vibrações provenientes do disparador não são transmitidas ao resto da estrutura nem influenciam os valores lidos nos extensómetros. A bancada de ensaios soma um peso total de 1,4 toneladas. Pormenores da concepção da bancada de ensaios podem ser encontrados nos desenhos técnicos de fabrico (Anexo 3).

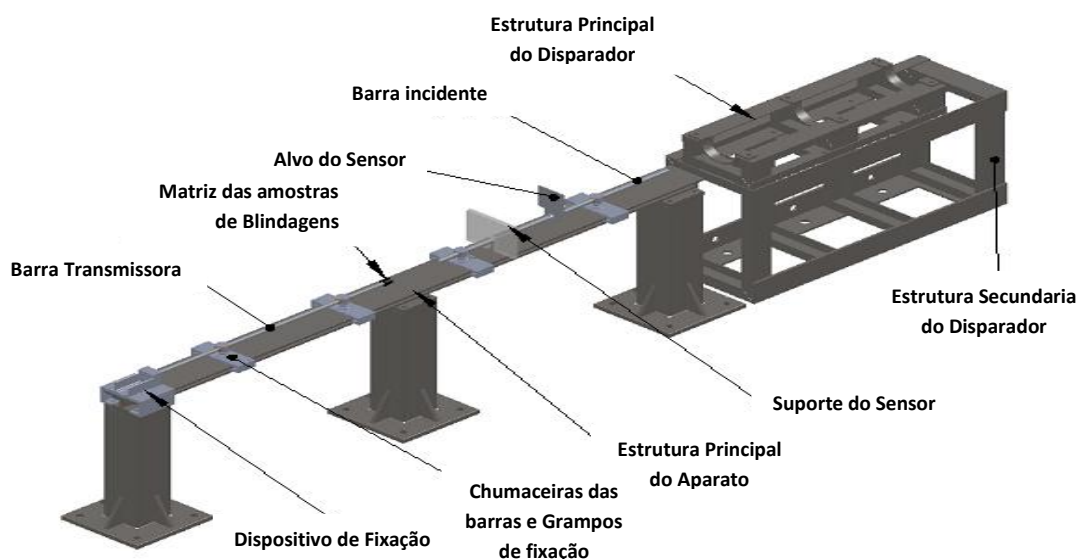


Figura 4.1 - Modelo 3D da Bancada de Ensaio Balísticos.

No que diz respeito à estrutura principal e secundária do disparador, estas foram produzidas a partir de perfis de aço U e L, tendo as suas ligações sido feitas através de cordões de soldadura.

De modo a que o disparador electromagnético possa estar fixo foram também desenvolvidos três aros (Figura 4.3a). Estes aros foram concebidos de forma a facilitar a operação de alinhamento do disparador, permitindo um impacto uniaxial e ainda de modo a abraça-lo em todo o seu diâmetro.

De modo a que a barra incidente se movimente ao longo do eixo de impacto com o menor atrito possível e que a barra transmissora fique no alinhamento axial da anterior, são necessárias quatro chumaceiras (duas para cada barra) (Figura 4.3b). Para o seu interior foram ainda desenvolvidos casquilhos a partir de teflon de modo a reduzir o atrito.

Uma vez que as chumaceiras das barras tinham que se encontrar fixas na mesa da estrutura do aparato, mas ao mesmo tempo permitir uma fácil manipulação de modo a variar as posições das barras, foi projectado e desenvolvido um sistema de grampos nos quais estas encaixam (Figura 4.3c). Os grampos abraçam assim a mesa da estrutura, garantindo a fixação dos suportes das barras. Referir ainda, que num destes sistemas encontra-se a chaveta introduzida no escatél (explorado já de seguida) apresentando-se como indica a figura 4.2c.

A barra incidente é um dos constituintes deste aparato. No presente trabalho esta não é utilizada como nos tradicionais Hopkinson (em que serve também de barra de aquisição), não contendo o conjunto típico de extensómetros. Existe pois um corpo de menor massa ao sofrer um impacto de outro com maior massa, vai deslocar-se com uma velocidade superior à daquele que lhe impõe o deslocamento. Esta barra resume-se a um varão cilíndrico de alumínio, tendo um comprimento de 1350mm, diâmetro de 30mm e um peso de 2,5 quilos. Na extremidade a montante, esta dispõe duma rosca interior a qual permite a fixação do sistema de acoplagem do projectil a testar (Figura 4.4c). Este sistema permite assim, de uma forma rápida uma troca de projecteis e ainda uma eficaz fixação.

Esta barra contém ainda um escatél (Figura 4.2a), pois nesta encontra-se o alvo pertencente ao sensor de deslocamento, tendo este que se manter direito de modo a que o sensor possa funcionar correctamente. Assim através de uma chaveta (Figura 4.2b), garante-se o encaixe desta no escatél assegurando que a barra incidente não roda sobre o seu próprio eixo, tendo unicamente um movimento axial.

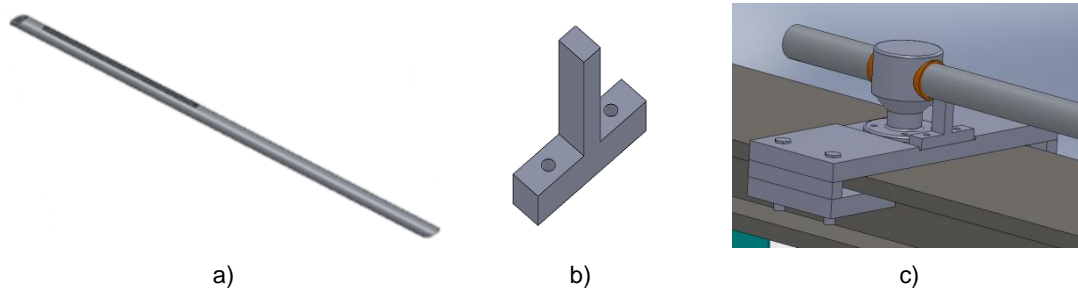


Figura 4.2 – a) - Modelo 3D da barra incidente com a representação do escatél. b) – Modelo 3D Chaveta utilizada para fazer o guiamento da barra, através do escatél. c) – Modelo 3D da chaveta no grampo de fixação do suporte da barra.

A barra transmissora consiste num varão cilíndrico de alumínio, com 1350 mm de comprimento por 25 mm de diâmetro. É essencial que a relação comprimento – diâmetro satisfaça a teoria unidireccional da propagação das ondas de pressão, daí o comprimento ser muito maior que o diâmetro. Só desta forma é possível obter uma onda de pressão pura, assim como medir as ondas incidentes e reflectidas de forma independente [57, 44]. Também esta barra se encontra montada de forma diferente dos tradicionais sistemas de Hopkinson, estando constrangida a montante no eixo de impacto, de modo a que a simulação do ensaio balístico seja o mais real possível. Deste modo a onda a medir será inevitavelmente só a da barra incidente, estando esta a funcionar praticamente como uma típica célula de carga extensométrica. Para que fosse possível fixar a barra, foi projectado e desenvolvido um dispositivo que permitisse aguentar os níveis de energia envolvidos nos ensaios balísticos (Figura 4.3d). Ainda na barra transmissora a jusante, foi desenvolvida uma matriz para fixar as amostras de blindagens a testar (Figura 4.3e). Este foi produzido através de varão de aço de diâmetro 40mm, e permite acoplar a blindagem, possibilitando realizar os ensaios em condições extremas, isto é, confinando as energias de disparo a uma zona restrita.

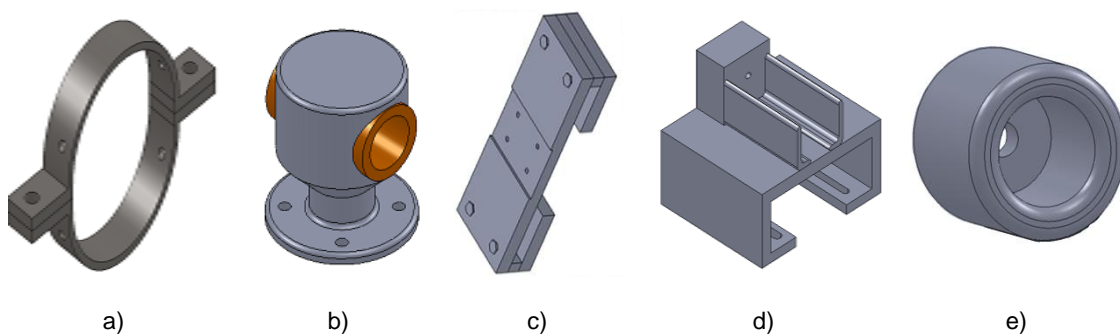


Figura 4.3– Projecto de componentes para guiamento e fixação: a) Aro para fixação do disparador electromagnético. b) Chumaceiras com casquilhos de teflon. c) Grampo para fixação das chumaceiras. d) Dispositivo de fixação da barra transmissora. e) Matriz para fixação das blindagens.

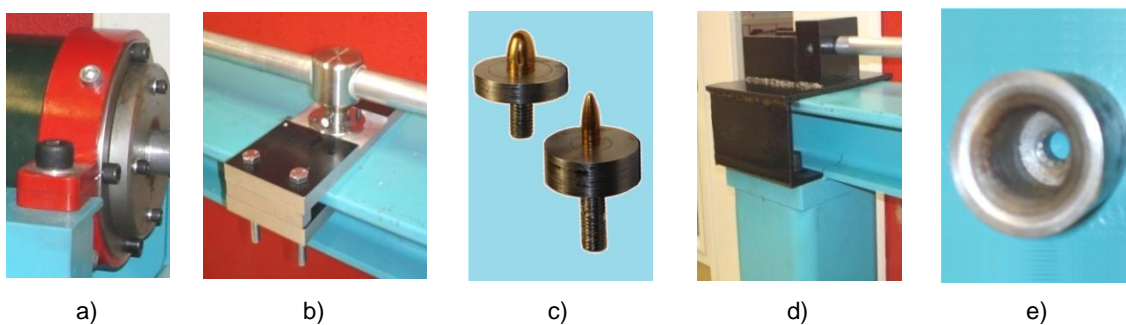


Figura 4.4 – Fabrico de montagem de componentes para guiamento e fixação: a) Aro para fixação do disparador electromagnético. b) Grampo para fixação das chumaceiras. c) Matriz para acoplagem dos diferentes projecteis. d) Dispositivo de fixação da barra transmissora. e) Matriz para fixação das blindagens.

4.3. Disparador Electromagnético

O presente disparador electromagnético foi concebido com base no efeito escala, sendo uma reconfiguração e reestruturação do último protótipo de disparador apresentado no capítulo 2. Através do estudo efectuado na realização do terceiro protótipo sabe-se que a eficiência do disparador aumenta com o aumento das suas dimensões, deste modo as grandezas do actual invento foram consideradas tendo em atenção a eficiência e ainda dois factores aliados, os aspectos económicos e o espaço físico existente para a realização dos ensaios balísticos. Este foi projectado de forma a efectuar-se ensaios balísticos com os projecteis standard NATO de calibre 9 mm e 5.56 mm, com níveis de energia iguais/semelhantes ao de um disparo real, colmatando assim uma lacuna há muito existente.

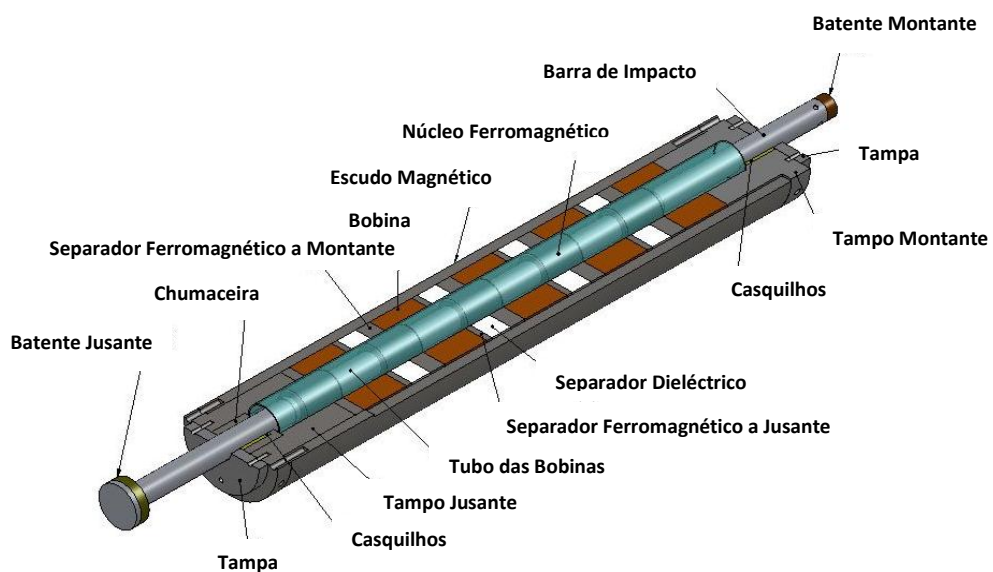


Figura 4.5 - Representação em detalhe do disparador electromagnético - vista em corte.

O sistema desenvolvido é constituído por: 1) Escudo Magnético, 2) Tampo Montante, 3) Tampo Jusante, 4) Tampa, 5) Casquilhos, 6) Chumaceira, 7) Bobina, 8) Tubo das Bobinas, 9) Separador Ferromagnético a Montante, 10) Separador Ferromagnético a Jusante, 11) Separador Dielétrico, 12) Barra de Impacto, 13) Núcleo Ferromagnético, 14) Batente Montante, 15) Batente Jusante.

4.3.1. Princípio de Funcionamento do Disparador

O conceito base consiste na incorporação de vários núcleos ferromagnéticos na barra de impacto, fazendo corresponder uma bobina a cada, permitindo assim um somatório de forças originárias de cada um dos conjuntos bobina/núcleo, sendo o disparo efectuado simultâneo. Como referido anteriormente, o funcionamento caracteriza-se pela simultânea e rápida passagem de uma corrente eléctrica por cada uma das bobinas, recorrendo ao banco de potência de alta tensão (explicado no ponto 4.4.). A passagem da corrente pelas bobinas origina a criação de um campo magnético, o qual provoca a deslocação dos núcleos

ferromagnéticos para o centro da bobina respectiva. Isto, pois quando um núcleo se aproxima do campo criado pela bobina é magnetizado por este, adquirindo uma magnetização inversa à do campo da bobina (Figura 4.6). Este pólo induzido é atraído para o pólo da bobina, resultando numa aceleração do núcleo, sempre no sentido do centro da bobina. Por sua vez, e como se encontram distribuídos em série na barra de impacto, os núcleos originam a deslocação da barra com um valor de energia correspondente ao somatório dos vários binómios núcleo/bobina.

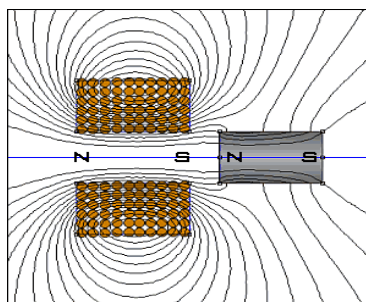


Figura 4.6 - Esquema do comportamento dos binómios bobina/núcleo ferromagnético – Linhas de campo criadas na bobina e respectiva polarização a quando da aproximação de um núcleo ferromagnético.

Para que as linhas de campo de cada bobina se direccionem apenas para o núcleo ferromagnético correspondente, são colocados separadores dieléctricos impossibilitando que estas se direccionem para os restantes conjuntos de activação bobina/núcleo. São também utilizados separadores magnéticos de elevada permeabilidade magnética de forma a direccionar as linhas de campo para cada um dos núcleos correspondentes. O separador ferromagnético a jusante é mais curto que o separador ferromagnético a montante, uma vez que junto da bobina interessa compactar as linhas de campo, impedindo que se espalhem e interfiram nos conjuntos bobina/núcleo vizinhos. Por sua vez, a montante interessa que o fluxo se direcione todo para o núcleo ferromagnético correspondente, daí a necessidade do separador magnético a montante ser mais largo. Ainda relativamente à questão das linhas de campo, de forma a aumentar o gradiente de fluxo foi utilizado um escudo magnético que conduz as linhas de fluxo magnético, concentrando-as, aumentando assim a força resultante nos núcleos.

Outra particularidade deste sistema encontra-se na barra de impacto, a qual ao ser apoiada apenas em dois casquilhos, permite eliminar a interacção dos núcleos com o tubo da bobina, reduzindo assim atritos entre componentes, melhorando a eficiência.

De referir que a posição inicial dos núcleos ferromagnéticos em relação ao início das bobinas é uma variável de extrema importância. Demasiado a montante têm tendência a sofrer forças dos campos magnéticos das bobinas anteriores, demasiado a jusante diminuem muito a distância de aceleração, ou seja a distância até ao centro da bobina. Esta nova concepção estrutural visa permitir activações lineares silenciosas com elevadas taxas de energia.

4.3.2. Concepção e fabrico

De modo a aumentar a potência do disparo, procedeu-se em primeiro lugar através de projecto, a uma optimização e ao aumento das dimensões do disparador. Os desenhos técnicos são apresentados no Anexo 4, permitindo ter uma noção das dimensões envolvidas, bem como de alguns pormenores não visíveis nos modelos 3D.

O escudo magnético (1) é um tubo de material ferromagnético (aço), sendo este o componente estrutural que serve de suporte a todos os restantes elementos. Ao longo do seu comprimento são colocadas as 5 bobinas (7), os separadores ferromagnéticos a montante e jusante (9) (10) e os separadores dieléctricos (11). Foi ainda previsto este conter um rasgo de 8mm ao longo de quase toda a totalidade do seu comprimento, que permita a passagem dos fios das bobinas. Todos os componentes se encontram interligados axialmente, permitindo assim um excelente alinhamento longitudinal. Este alinhamento é ainda garantido através do tubo das bobinas (tubo de acrílico) (8), que passa através do diâmetro interior das bobinas e dos separadores.

No que diz respeito à bobina, esta é um elemento essencial da propulsão electromagnética, sendo composta por um enrolamento em espiral de fio de cobre com 4 mm de diâmetro, a espiral prolonga-se por um comprimento de 90 mm. O diâmetro interno da bobina é de 68mm e o diâmetro exterior é de 160mm. O fio encontra-se revestido por uma camada de verniz que permite o isolamento eléctrico com o exterior. Foi seleccionado por ser um material altamente condutor, de baixo custo e maleável, facilitando o seu enrolamento em torno do tubo. As principais propriedades do cobre são apresentadas no Anexo 5 [58]. Cada passagem do enrolamento revestiu-se com uma camada de verniz, fornecendo simultaneamente isolamento eléctrico adicional entre os fios, bem como coesão estrutural entre os vários fios, facilitando o enrolamento da bobina. No total em cada bobina foram efectuadas 11 passagens. Para a montagem da bobina foi necessário construir um suporte adequado de forma a garantir as dimensões e formatos desejados (Figura 4.7).

Nas extremidades do escudo magnético, encontram-se acoplados os tampos a montante e jusante (2) (3) em material ferromagnético, que além de permitirem a fixação e a compactação de todo o sistema, suportam o sistema de casquilhos (5) da barra de impacto (12), de forma a garantir um deslocamento sem atritos e um perfeito alinhamento. O casquilho a jusante, tem a particularidade de não se encontrar directamente no tampo, mas sim fixo na chumaceira (6), de modo a que a barra de impacto possa ser retirada, sem a necessidade de desmontar todo o disparador. Também neste pequeno elemento (que tem importância extrema, pois é o responsável pelo deslocamento correcto da barra de impacto), houve considerações a ter em conta, considerações essas verificadas em fases anteriores de desenvolvimento do disparador. O que se constatou, foi o facto de que com a utilização de um rolamento linear, a barra de impacto começava a ficar “gripada” (riscada devido ao deslocamento da barra) passadas poucas utilizações. Assim deste modo colocou-se em hipótese a utilização de

casquilhos que evitem tal facto. Os casquilhos utilizados, são assim de atrito e auto-lubrificantes, devido ao material presente na sua constituição (Nylon) (Figura 4.8c). As tampas a jusante e a montante (4) servem como tampas dos casquilhos.

A barra de impacto construída em alumínio (podendo ser fabricada em inúmeros materiais desde que não magnéticos) contém incorporada de forma concêntrica os núcleos ferromagnéticos (13), constituídos por dois semi-tubos de material ferromagnético (Figura 4.8a). A montagem dos núcleos na barra de impacto é efectuada através do encaixe destes nas reentrâncias existentes na barra e é ainda realizada uma pequena soldadura por pontos (TIG) nos dois semi-tubos, de modo a que haja uma perfeita fixação dos núcleos à barra de impacto, não permitindo assim que os núcleos se desloquem da sua posição aquando da descarga. A barra de impacto (Figura 4.8b) é um dos componentes mais importantes do disparador, uma vez que esta é também um elemento principal na propulsão. Desta forma foi necessário estudar e projectá-la para que o seu peso fosse o menor possível (bem de como todos os seus constituintes, daí os núcleos serem maquinados no seu interior). Se fosse aumentar numa proporção igual à dos restantes constituintes não conseguiria ter os níveis energéticos pretendidos (Energia cinética $\rightarrow E_c = 1/2mv^2$). O Projecto contemplou então numa primeira fase um estudo de mercado, de modo a conhecer o material disponível, para que de seguida se procedesse a várias montagens possíveis (em modelo CAD), com vista a obter uma conclusão de qual a constituição da barra de impacto. No Anexo 6, estão representadas algumas das hipóteses postas em causa nesta fase. A barra de impacto ficou então com uma massa final de 5,22 quilos.

Por fim, existem dois batentes acoplados à barra de impacto. A jusante, um em alumínio e plástico, que tem por finalidade o controlo do deslocamento da barra (a posição limite de accionamento da barra do disparador, pois os núcleos quando forçados a deslocar-se para o centro da bobina podem ultrapassar ligeiramente o centro desta) e a dissipação do remanescente da energia do disparo. A montante, o outro em aço, não permite a deformação do tubo de alumínio aquando do choque.

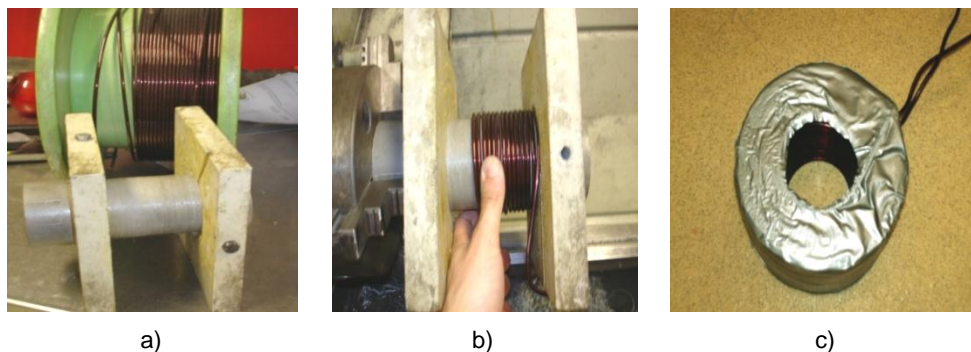


Figura 4.7 – a) - Material necessário à montagem da bobina. b) - Desenvolvimento da bobina.
c) - Bobina produzida para o sistema de propulsão.

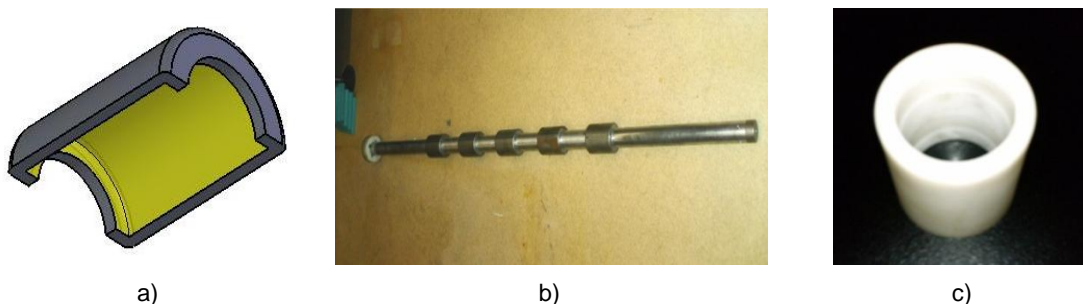


Figura 4.8 – a) Modelo 3D dos núcleos ferromagnéticos. b) Barra de Impacto com os núcleos. c) Casquilho de atrito auto-lubrificante.

4.4. Banco de Potência

O sistema de potência implementado é na sua essência, um conjunto de cinco circuitos RLC (Figura 4.9). Cada um desses circuitos resulta então num conjunto de quatro condensadores de 450 volts e 6000 μ F (EVOX RIFA - PEH200YX460BQU2) em paralelo ligados a cada bobina. Os condensadores encontram-se ligados a um transformador de 2000 volts, estando este por sua vez ligado a um transformador variável que permite regular a tensão da rede, definindo assim o valor de carga dos condensadores. De referir que os condensadores são carregados com um valor de tensão proporcional à velocidade que se pretende para a activação da barra de impacto.

Uma vez que a corrente fornecida pela rede é alterna, é necessária a utilização de pontes rectificadoras (rectificador de onda – KBPC2510), possibilitando o carregamento dos condensadores. De modo a completar o circuito de carga RC, existem três resistências ligadas em paralelo, fornecendo uma resistência de carga.

Em paralelo ao circuito RLC, e com o objectivo de escoar a corrente induzida pelo *kickback* induzido e proteger as bobinas aquando da descarga, existem diodos de *free-wheeling* (Westcode Semiconductors - W0646WC120). A rápida descarga dos condensadores é conseguida através de um sistema de activação de tiristores (Semikron - SKT552/16E), os quais se encontram ligados a transformadores variáveis (1,5 a 12 volts) que aquando da activação dos relés (Siemens-V23101), proporcionam que ocorra a descarga.

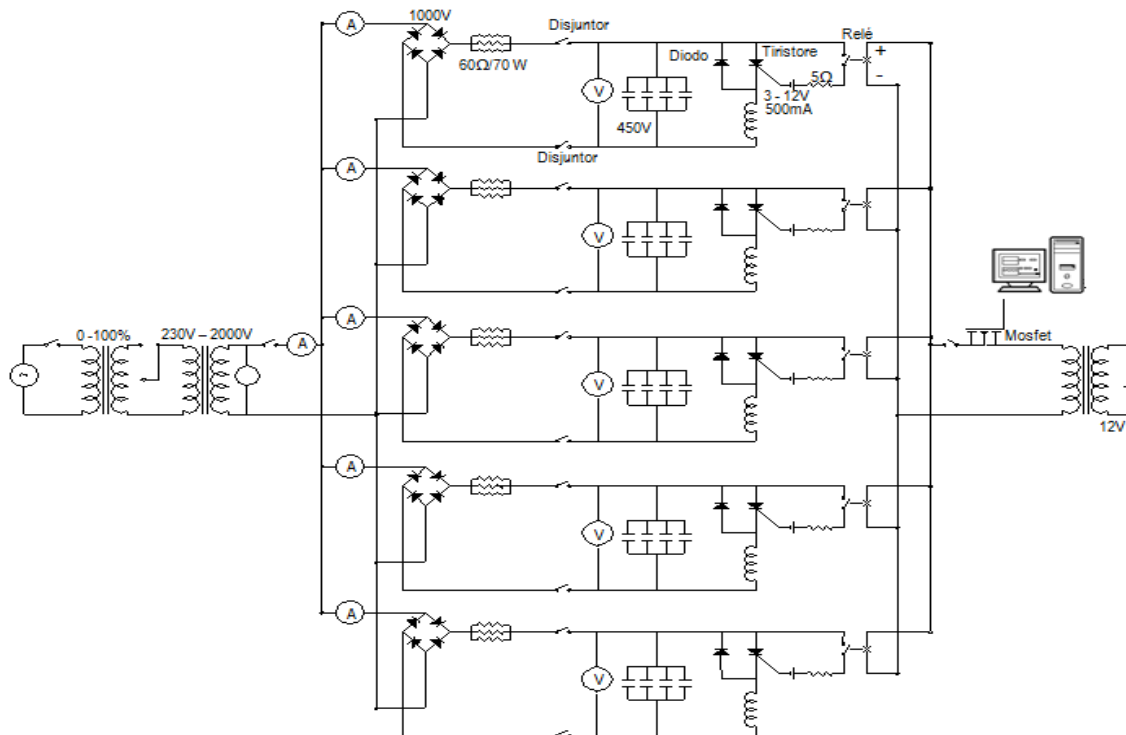
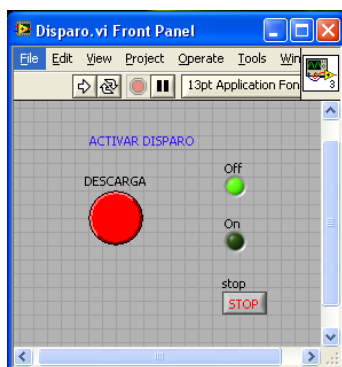


Figura 4.9- Esquema eléctrico do banco de potência utilizado para efectuar a descarga eléctrica nas bobinas do actuador de relutância magnética.

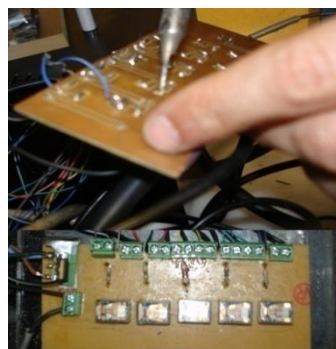
Tal como se pode constatar a partir da figura 4.9, a parte da descarga do circuito RLC funciona como um circuito em paralelo. Para activação dos relés recorreu-se a software informático, tendo sido desenvolvido um programa (Figura 4.10a) a partir de linguagem de programação em *Labview*. O programa permite enviar pulsos de onda quadrada (sinal digital de 0 a 5 volts) que activam o mosfet que por sua vez permite activar os relés. Este programa foi desenvolvido por necessidade de se ter um disparo o mais rápido possível. Existe ainda um interruptor de segurança de 25A de modo a salvaguardar, qualquer possível “bug” do sistema informático. Devido às dimensões reduzidas dos componentes electrónicos envolvidos na descarga resolveu-se fazer uma placa de circuito impresso (Figura 4.10b).

Para conceber este banco de potência teve que se projectar tudo ao pormenor, na medida que falamos de componentes electrónicos que envolvem orçamentos elevados. Uma vez que os condensadores necessitavam de ter associadas resistências (por forma a não efectuarem um carregamento muito rápido, o que lhes retira tempo de vida), houve a necessidade de dimensionar e assegurar que para 450 volts, estas mesmas aguentavam. Deste modo, foi necessário fazer um estudo baseado na teoria apresentada no capítulo 3, em particular pela Eq. 10, verificando-se que o sistema necessita de valores elevados de corrente unicamente no início (segundos) e como tal não precisaríamos de resistências muito altas (o que era o indicado devido ao seu elevado custo monetário). Na verdade, estas só precisariam de ter uma potência dissipativa capaz de aguentar o pico inicial. Com os valores de potência e ohmicos de resistências existentes em mercado (com um custo o mais reduzido possível)

realizaram-se cálculos que permitiram escolher a melhor resistência a aplicar. Assim a configuração escolhida foi a utilização de três resistências bobinadas em paralelo (cada uma com 60Ω e 70W) perfazendo um valor ohmico equivalente de 20Ω e uma potência dissipativa equivalente de 210W (Figura 4.11a). De modo a comprovar toda a teoria, montou-se ainda um aparato experimental de modo a verificar a funcionalidade do circuito de carga (Figura 4.11b).

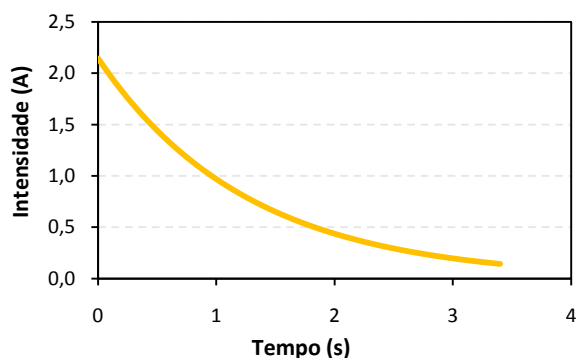


a)



b)

Figura 4.10 – a) - Programa desenvolvido para a activação dos relés. b) - Placa de Circuito Impresso desenvolvida.



a)



b)

Figura 4.11 – a) - Variação da corrente durante o tempo de carga dos carregadores, para $V=450V$, $R=210\Omega$ e $C=6000\mu F$, dos 0 a 4 segundos. b) - Aparato experimental de verificação da funcionalidade do circuito de carga.

O banco de potência foi projectado e desenvolvido, com o princípio base de tornar todo o sistema o mais modular possível. Assim, deste modo foram realizadas 5 caixas de vidro acrílico e maquinadas placas de PVC, com o intuito de fazer bases para colocar os quatro condensadores (Figura 4.12a e b), referentes a cada bobina. No topo dessas caixas foi depois colocada a ponte rectificadora, as resistências, o tiristore e o diodo, referente também a cada bobina. Para o tiristore e para o diodo foi concebido um sistema individual para os fixar, sendo constituído para cada um, por duas placas de vidro acrílico que os constroem. Este sistema é suficientemente robusto, garantindo que as ligações feitas por contacto directo entre os terminais e os topos dos tiristores e/ou diodos são realizadas sob elevada pressão, de modo a reduzir a resistência de contacto (Figura 4.12c).

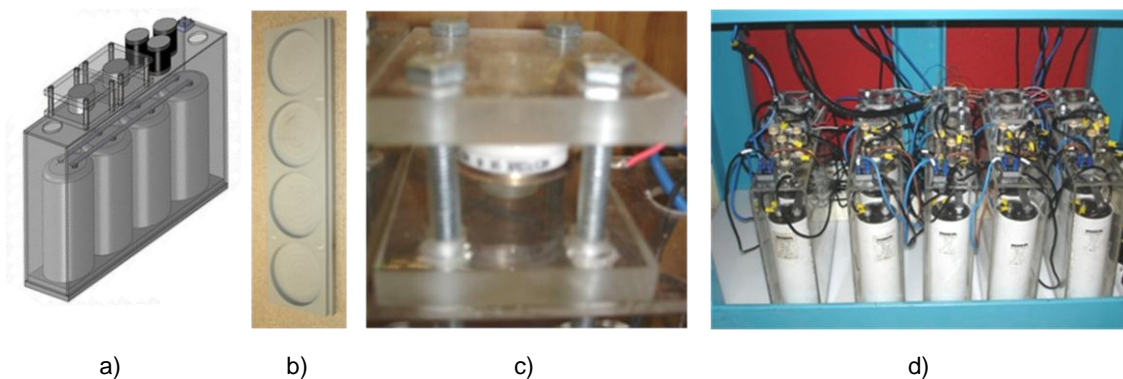


Figura 4.12– a) Modelo 3D de um banco de potência modular. b) Bases para os condensadores. c) Sistema de fixação implementado quer para o diodo, quer para o tiristore. d) Bancos de Potência modulares referentes às cinco bobinas.

Para efectuar as ligações dos condensadores, tal como se pode ver na figura 4.12a, foram feitas placas maquinadas a propósito a partir de alumínio (de modo a reduzir a alumina que poderia causar resistência à passagem da corrente, as placa foram lixadas e polidas). Estas placas evitam assim ter um confuso sistema de fios e permitem ainda no caso de haver necessidade de mudar a configuração da ligação (paralelo ou série), que esta seja facilmente efectuada (sendo unicamente necessário rodar dois condensadores nas bases e fazer alteração da disposição das placas).

É importante mencionar que aquando das descargas se verificou que para se obter uma descarga rápida, o ganho de energia armazenada em série comparativamente a paralelo não compensa, pelo menos para tensões inferiores aos 2000Volts, pois o que nos interessa é um di/dt elevado e tal consegue-se mais facilmente com os condensadores em paralelo.

Foi ainda intenção conjugar numa só estrutura todos os controlos de fecho e abertura do circuito, todos os interruptores responsáveis pelo corte de energia geral, carga e descarga do circuito, bem como a monitorização da carga dos condensadores (feita através de amperímetros e multímetros). Para tal foi construída uma consola de controlo e monitorização (Figura 4.13), permitindo o controlo e monitorização das variáveis inerentes.

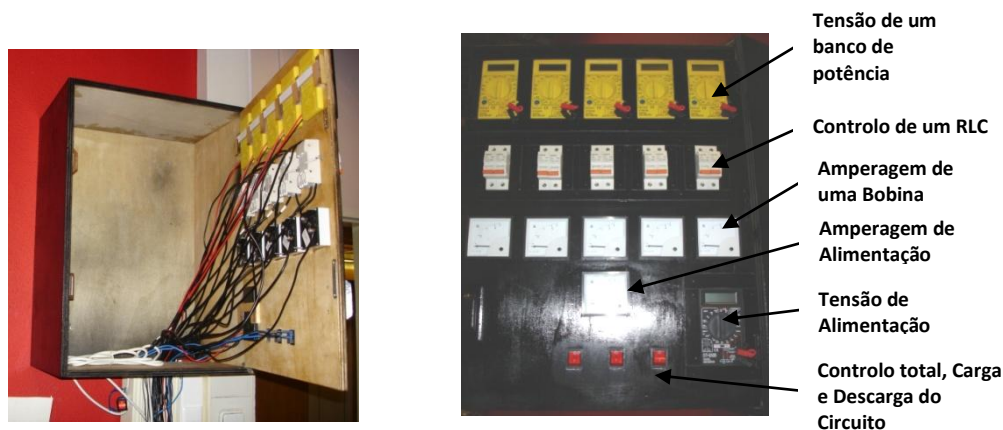


Figura 4.13 Consola de controlos e monitorização da carga e descarga do circuito.

4.5. Controlo e monitorização

Existem diversos métodos para realizar a aquisição de dados na Barra de Hopkinson. Na presente dissertação foram utilizados dois métodos. O método convencional dum célula de carga (transdutor de carga), baseada na tecnologia de extensometria e ainda um sensor de deslocamento. A monitorização das principais variáveis do sistema foi realizada recorrendo a diversos equipamentos, que serão apresentados no ponto 4.5.4.

4.5.1. Tradutor de Carga

Os medidores de deformação, também conhecidos como extensómetros eléctricos são dispositivos que transformam pequenas alterações nas dimensões em variações equivalentes no seu valor de resistência. Os extensómetros uniaxiais (Figura 4.14a) utilizados na aquisição, são ligados por norma, numa configuração em ponte de resistências. A ponte de resistências mais usual é a da Ponte de *Wheatstone*¹². Esta configuração consiste na combinação de quatro extensómetros, configurados como dois circuitos em paralelo (Figura 4.14b).

Na aquisição feita com extensómetros uniaxiais existem algumas considerações básicas a ter em conta na sua montagem. Os extensómetros têm que ser montados no centro longitudinal da barra, conforme ilustrado na figura 4.14c. Essa montagem tem como principal objectivo facilitar o processamento dos sinais obtidos. Estes não podem ser montados directamente na amostra da blindagem a analisar, não apenas por esta ser muito pequena e sofrer uma elevada deformação plástica (ao contrário da barra que só sofre deformação elástica), mas essencialmente por se destinar a ensaios destrutivos.

Todos os produtos e utensílios utilizados na limpeza de superfícies, colagem e soldagem dos extensómetros, foram fornecidos pela Vishay, conseguindo-se assim uma diminuição da probabilidade de falha devido a uma imperfeita qualidade ou incorrecta aplicação dos produtos usados na concepção da célula de carga (Figura 4.14d).

No caso da célula de carga utilizada (barra transmissora) foram aplicados extensómetros com a mesma resistência, logo aplicando a lei das malhas ao circuito e

¹² Desenvolvida em 1833 por S. H. Christie.

analisando a Eq. 47, verifica-se que na ausência de variação nos extensómetros ao nível de resistência, a voltagem aos terminais de saída será zero. No entanto, se houver uma variação nas dimensões da célula, como por exemplo, quando se comprime o material, os extensómetros irão sofrer deformação e consequentemente a leitura aos terminais será proporcional ao valor da carga que se aplicou para deformar a célula.

$$\frac{V_{out}}{V_s} = \frac{R_3}{R_3 + R_4} - \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (\text{Eq. 47})$$

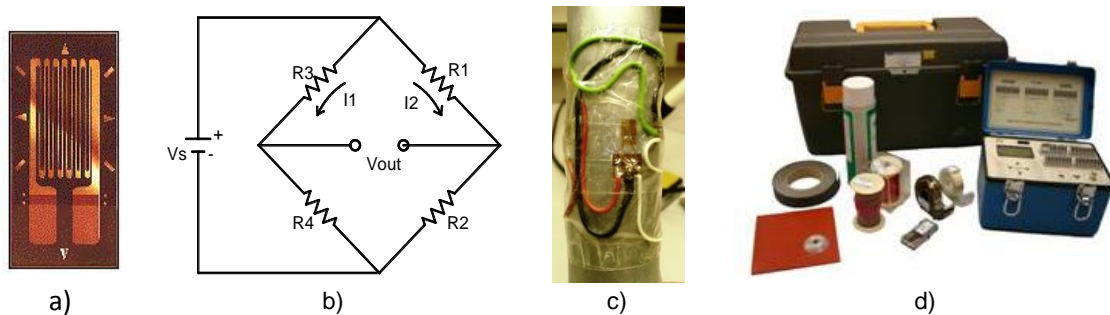


Figura 4.14 – a) Extensómetro uniaxial. b) Ponte de Wheatstone. c) Montagem de extensómetros na barra transmissora implementada. d) Produtos e utensílios utilizados na elaboração da célula de carga.

Foi necessário converter as unidades eléctricas em dimensões físicas, para tal calibrou-se a célula de carga através de instrumentos que permitissem a identificação da dimensão física a ser medida, para posteriormente comparar com a unidade eléctrica. A célula de carga foi calibrada estaticamente com o auxílio de uma célula de carga comercial HBM tipo C9B de 50kN de capacidade nominal (Figura 4.15a), com sensibilidade nominal de 1mV/V (o que significa que quando a célula é sujeita à carga nominal de 50kN, por cada Volt de excitação à entrada, apresentará na saída uma variação de tensão de 1 mV). Colocadas em série, ligadas simultaneamente ao amplificador de sinal e ao sistema de aquisição de dados e, implementando carga progressiva no sistema, foi possível obter os valores de voltagem da célula a calibrar. Por comparação com os valores de carga debitados pela célula de carga HBM, foi possível relacionar os valores de voltagem com os de carga correspondente. A figura 4.15a mostra a carga aplicada em função da voltagem, podendo identificar-se a função que caracteriza a calibração da célula de carga. Logo, o valor da força exercida é dado pela seguinte equação:

$$F[N] = 11604 \cdot V \quad (\text{Eq. 48})$$

Os sinais obtidos apresentam uma amplitude demasiado pequena, como tal é necessária a utilização de um amplificador de forma a ter-se uma aquisição correcta, sendo

este sinal adquirido num computador, através de um programa desenvolvido com base na linguagem de fluxo de programação em *Labview* (Figura 4.15b). O amplificador utilizado foi o 2310B conditional amplifier (Figura 4.15c).

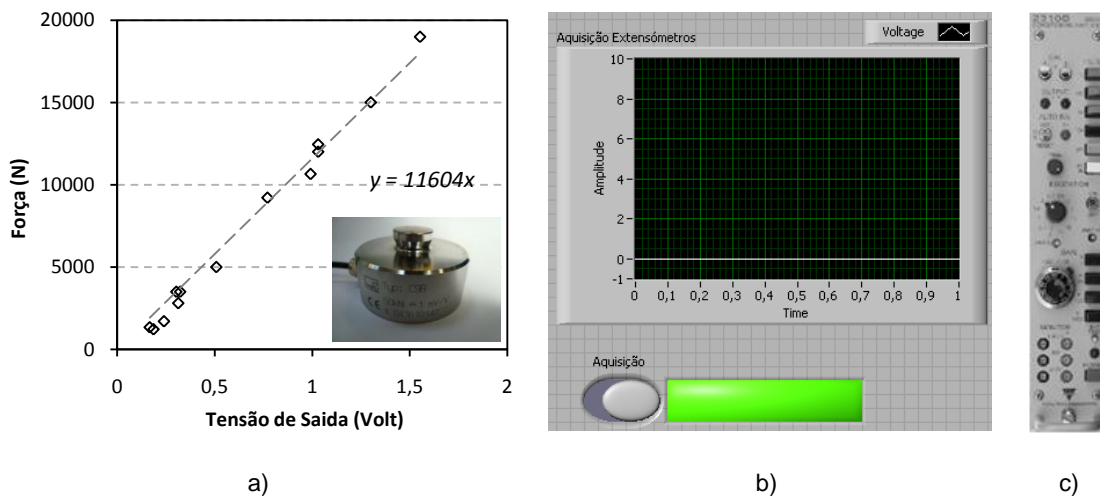


Figura 4.15 – a) Calibração da célula de carga a partir da Célula de carga *HBM C9B 50kN*, b) Programa desenvolvido para aquisição dos sinais dos extensómetros, c) Amplificador 2310B.

4.5.2. Sensor de deslocamento

O sensor de deslocamento ECL100 é composto por uma sonda com um cabo uniaxial (responsável pela ligação da sonda ao sensor) e ainda um transformador (12-24VDC) (Figura 4.16b). Este foi utilizado, com o intuito de se conseguir saber os valores de energia e velocidade, no preciso momento antes do impacto do projectil na blindagem (através do deslocamento e tempo).

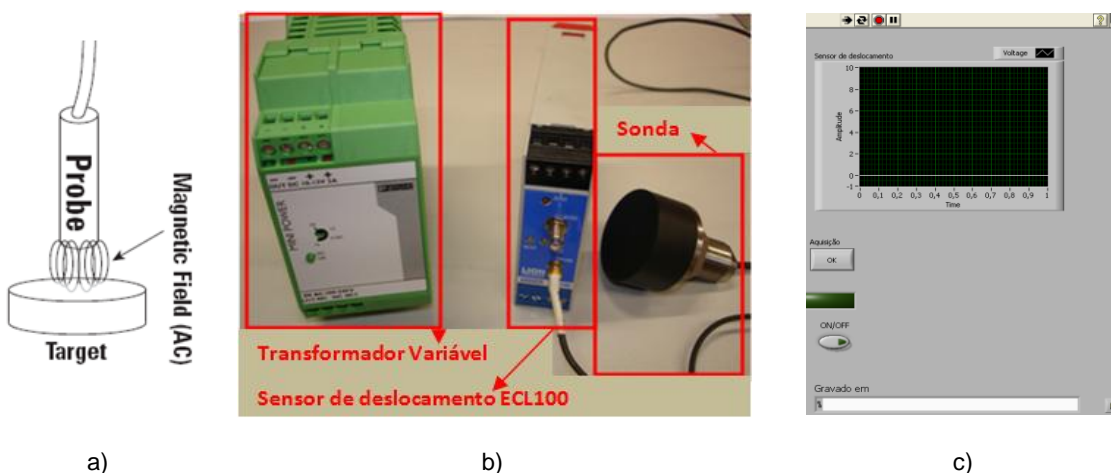


Figura 4.16 - a) Esquema representativo do funcionamento do sensor, b) Sensor de deslocamento e componentes, c) Programa desenvolvido para a aquisição do sinal do sensor de deslocamento.

O sensor funciona através de correntes de Eddy (produzidas na sonda) e de modo a explicar o seu funcionamento é necessário perceber o que são estas correntes. Suponhamos então um campo magnético a variar perpendicular a uma face de condutor extenso (como por exemplo uma placa). O campo induzido causará a circulação de correntes neste condutor,

chamadas correntes de Eddy. Estas também podem ser produzidas se o condutor se mover numa região onde exista um campo magnético [59, 60].

A sonda do sensor encontra-se assim fixa e a gerar um campo magnético. O condutor (alvo) trata-se de uma placa de material magnético (em movimento), que ao interferir nesse campo magnético irá gerar um sinal output de voltagem proporcional à distância entre o sensor e o alvo. Este sinal é adquirido através de uma placa de aquisição (apresentada no ponto seguinte) ligada a um computador e por um programa desenvolvido recorrendo ao software Labview (Figura 4.16c).

No que diz respeito à montagem da sonda, teve-se em consideração vários aspectos, como:

- O dispositivo de suporte da sonda tinha que se encontrar fixo e não podia ser de material magnético, pois este interferia no campo magnético do sensor;
- Este dispositivo teria ainda que assegurar que, para os lados e retaguarda da sonda (numa distância igual a 3 vezes o diâmetro e 1,5 vezes o diâmetro do sensor respectivamente) não havia material magnético presente (diâmetro da sonda = 50mm);
- O condutor (alvo) tinha também que respeitar especificações, como espessuras e dimensões consoante o material escolhido para este.

Assim para o dispositivo de suporte do sensor, maquinou-se uma placa de PVC (material este que não interfere no campo magnético) tendo um sistema de fixação à mesa da estrutura do aparato (Figura 4.17a). Em relação ao alvo, o material escolhido foi alumínio, no qual a espessura mínima requerida para este tipo de material, por parte das designações do sensor era de 0,35mm, mas de modo a conferir estabilidade ao alvo (uma vez que este se desloca em conjunto com a barra incidente) a espessura estabelecida foi de 15mm. As dimensões do alvo (150x150mm) estão de acordo com as especificações requeridas (Figura 4.17b).



Figura 4.17 – Dispositivo de Suporte do Sensor Alvo de Alumínio do Sensor

Recorrendo ao sensor ECL100, foi possível determinar para cada nível de tensão do banco de potência do disparador os níveis de energia e velocidade do disparo instantes antes de o projectil atingir a blindagem (Figura 4.18). Conseguiu-se assim também determinar a energia máxima conseguida pelo disparador desenvolvido, centrando-se nos 320Joules (o que corresponde a uma velocidade de 16m/s para os 2,5kg da barra incidente $\rightarrow E_c=1/2mv^2$).

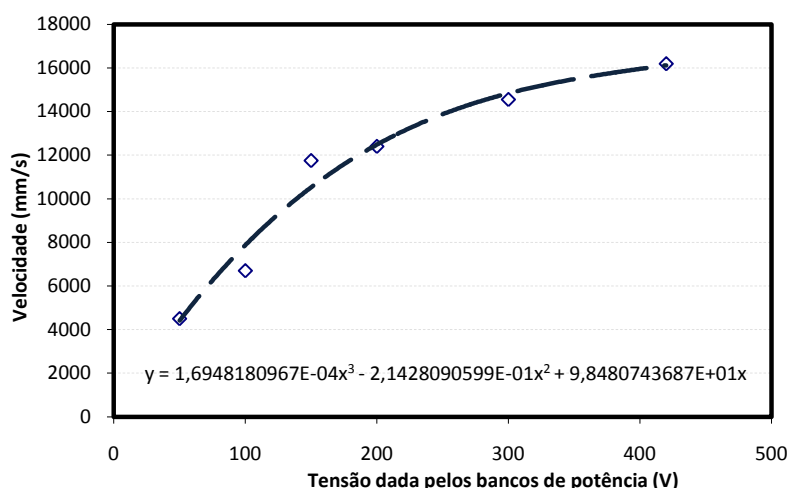


Figura 4.18 - Relação da velocidade do projectil com os valores de tensão dados pelo banco de potência, instantes antes de atingir a blindagem.

4.5.3. Placa de aquisição e controlo

Para que a aquisição em computador dos valores adquiridos quer pelo sensor, quer pelos extensómetros seja possível (com a elaboração de programas em labview) é necessária uma placa de aquisição. Tal também se verifica para o controlo do programa desenvolvido para a activação dos relés, responsável por efectuar o disparo. Assim, deste modo foi utilizada a para a aquisição e controlo de dados a placa *DAQ NI-PCI-6070E (M10-16E-1)* (Figura 4.19) de 16 entradas analógicas a 1.25 MS/s, resolução de 12bits e escala de entrada de $\pm 10V$.

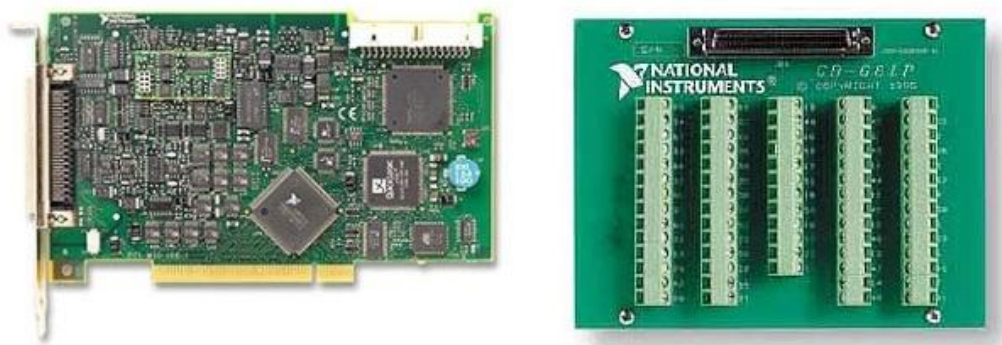


Figura 4.19 - Placa NI-PCI-6070E

4.5.4. Instrumentos de medição suplementares

De modo a que pudesse haver um controlo de todo o banco de potência, nomeadamente das cargas e descargas do circuito RLC, teriam que haver instrumentos a efectuar leituras em pontos chave desse mesmo (Figura 4.9). Desta forma utilizaram-se:

- Multímetros digitais (DT-830B), desempenhando um papel fundamental, pois através deles, conseguiu-se saber se os condensadores já se encontravam com a carga necessária para a realização dos ensaios pretendidos. Estes encontram-se ligados em paralelo com os quatro condensadores, tendo a função de voltímetros (V). Existe ainda um outro multímetro que

tinha como função permitir controlar com precisão o valor de tensão que se ia entregando aos cinco circuitos.

- Amperímetros Analógicos (D72SD5A/2-001), estes tinham a função de nos mostrar se em cada conjunto dos cinco circuitos RLC estava a passar corrente, tendo sido colocados em série, antes da ponte rectificadora. Existe ainda um, que tinha a função de medir a corrente que estava a ser entregue na globalidade dos cinco circuitos. Todos os instrumentos referidos anteriormente encontram-se instalados na consola de controlo e monitorização (Figura 4.13).

Por fim é então apresentada a figura 4.20 onde se pode visualizar todo o sistema de Ensaio Balísticos.



Figura 4.20 – Bancada de ensaios para a avaliação de blindagens balísticas instalada no Instituto Superior Técnico.

4.6. Blindagens Balísticas Seleccionadas

As blindagens balísticas escolhidas para efectuar os ensaios de caracterização, foram blindagens pessoais que actualmente se encontram em utilização no Exército Português. Na tabela seguinte é possível visualizar a selecção feita.

| Componentes/Utilização | Material |
|------------------------|------------------------|
| Colete Anti-Bala | Tecido Aramida |
| | Placa de Aramida |
| Capacete Balístico | Aço |
| | Aramida/Kevlar |
| Escudo Anti-Tumulto | Placa de Policarbonato |

Tabela 3 – Material Seleccionado para efectuar os ensaios de caracterização.

4.7. Plano de ensaios

Antes da realização dos ensaios foi elaborado um plano de ensaios. A estratégia adoptada passou pela realização de um impacto (de cada tipo de projectil – 9mm e 5.56mm) em cada tipo de blindagem, para de seguida se impor no mesmo local um outro impacto, para deste modo se conseguir compreender a degradação das blindagens (num caso extremo),

analisando-se assim a perda de capacidade da blindagem em absorver as energias. Colocou-se ainda em hipótese, no caso de no primeiro impacto existir perfuração, o segundo impacto ser numa zona imediatamente adjacente, de modo a ter novamente uma situação extrema em que a blindagem já se encontra debilitada. Além deste aspecto extremo, ainda outro foi considerado que foi o facto do ângulo de incidência ser 90°, em todos os ensaios realizados, testando-se assim as blindagens para o caso mais extremo conhecido. Pretendeu-se ainda fazer uma comparação entre as diversas blindagens.

No que se refere aos testes realizados nos capacetes balísticos, a estratégia utilizada foi diferente, tendo sido principal preocupação a comparação dos diferentes materiais que os compõem. Desta forma realizou-se apenas um impacto (de cada tipo de projectil – 9mm e 5.56mm) em cada capacete (aço e Kevlar). Na tabela 4 encontra-se de forma resumida, todo o plano de ensaios efectuado.

| Blindagem | Projéteis | Impactos | Observações |
|----------------------------|-----------|------------------|--|
| Tecido Aramida | 9mm | 2 ⁽¹⁾ | Ângulo de Incidência 90° (1) – 2º Impacto no mesmo local que o primeiro. |
| | 5,56mm | 2 ⁽¹⁾ | |
| Placa de Aramida | 9mm | 2 ⁽¹⁾ | |
| | 5,56mm | 2 ⁽¹⁾ | |
| Placa de Policarbonato | 9mm | 2 ⁽¹⁾ | |
| | 5,56mm | 2 ⁽¹⁾ | |
| Capacete de Aço | 9mm | 1 | |
| | 5,56mm | | |
| Capacete de Aramida/kevlar | 9mm | 1 | |
| | 5,56mm | | |

Tabela 4 – Plano de Ensaios.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A aplicação do disparador electromagnético em conjunto com todo o restante sistema de ensaios balísticos, permitiu avaliar o comportamento das blindagens anteriormente apresentadas. Recorrendo ao disparador electromagnético desenvolvido, a barra de impacto deste, desloca-se de encontro à barra incidente (que se encontra na estrutura do aparato), onde se encontra acoplado o projectil. Esta de seguida desloca-se contra a blindagem, efectuando desta forma a interacção do projectil com a blindagem, realizando-se assim o ensaio. Através dos sistemas de aquisição são adquiridos os valores das variáveis de interesse (força, deslocamento, e energias), permitindo a avaliação das blindagens em questão. Nos ensaios realizados a energia utilizada, imediatamente antes do impacto foi de 320Joules, tendo os parâmetros de disparo sido sempre rigorosamente controlados de modo a permitir uma coerência necessária nos resultados apresentados. Apesar da energia antes do impacto ter sido de 320Joules, mencionar que o aparato se encontra preparado para à posterior (a quando a introdução de mais condensadores), atingir maiores níveis energéticos. Referir apenas que a energia com que os ensaios se realizaram é bastante satisfatória, encontrando-se dentro dos parâmetros desejados, tal como se pode verificar pelos valores obtidos no programa da Norma Precision - Ammunition apresentados nas figuras 2.12 e 2.13.

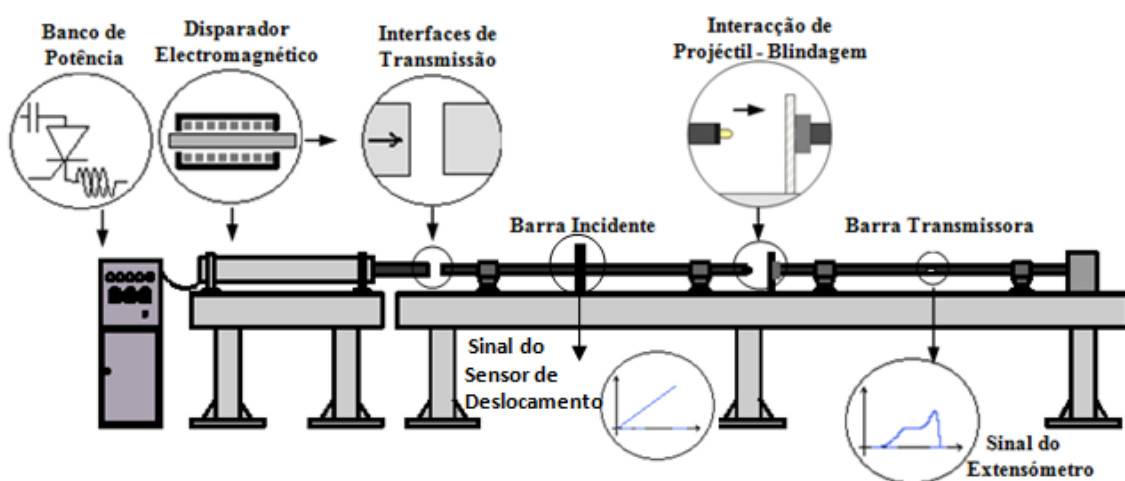


Figura 5.1- Esquema do Método de Funcionamento

5.1. Comportamento Mecânico Comparativo das Blindagens

Após a realização da primeira série de ensaios, foi possível obter os resultados relativos à capacidade das blindagens em estudo de absorver o impacto dos projecteis.

As figuras 5.2, 5.3, 5.4 e 5.5 apresentam a evolução da força em função do deslocamento após um impacto dos projecteis de calibre 9 mm e 5,56mm nas blindagens.

Após uma primeira análise dos resultados obtidos e apresentados nas figuras 5.2 e 5.3, é possível verificar uma maior capacidade da aramida (utilizada nos coletes anti – bala, tanto nas placas tácticas como nos tecidos do material de base) em absorver a força de impacto, comparativamente com o policarbonato utilizado nos escudos anti – tumulto. Pode ainda verificar-se, que devido à maior flexibilidade do tecido aramida, o projectil apresenta um maior deslocamento (Figura 5.2).

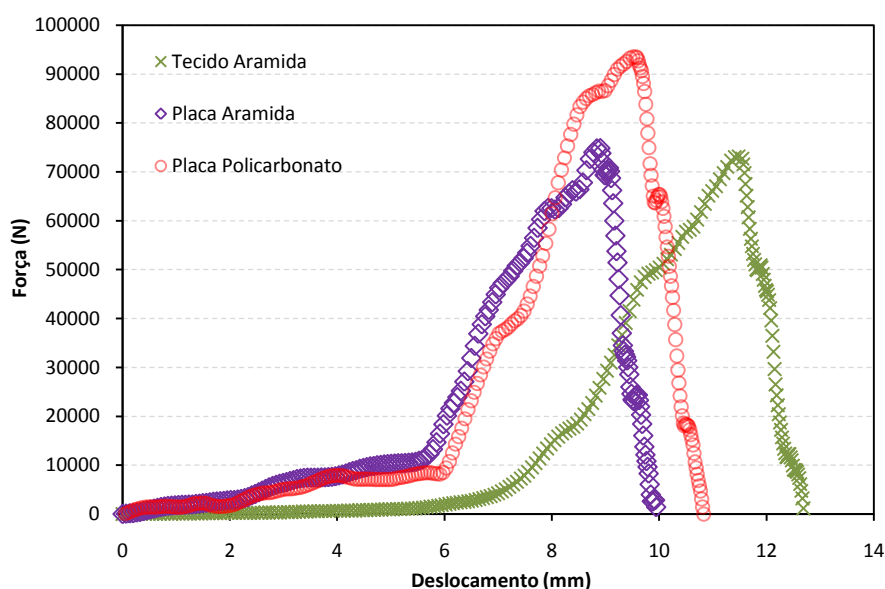


Figura 5.2 - Evolução comparativa da força transmitida pelas blindagens após impacto do projectil de calibre 9mm.

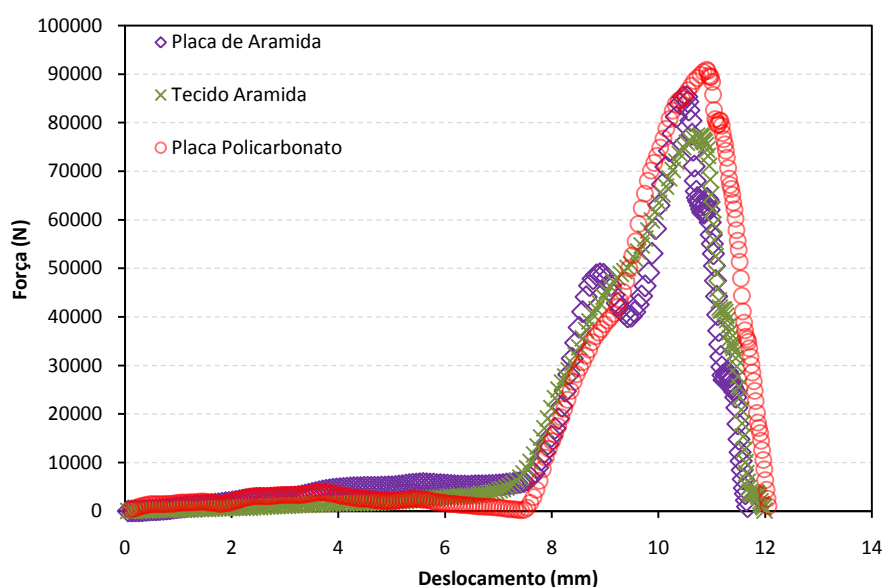


Figura 5.3 - Evolução comparativa da força transmitida pelas blindagens após impacto do projectil de calibre 5,56mm.

No que toca aos resultados obtidos dos capacetes balísticos (Figuras 5.4 e 5.5), aqui pode-se constatar uma maior absorção de energia por parte do capacete de aramida, o que tem lógica na medida que o aço apresenta uma dureza superior ao Kevlar.

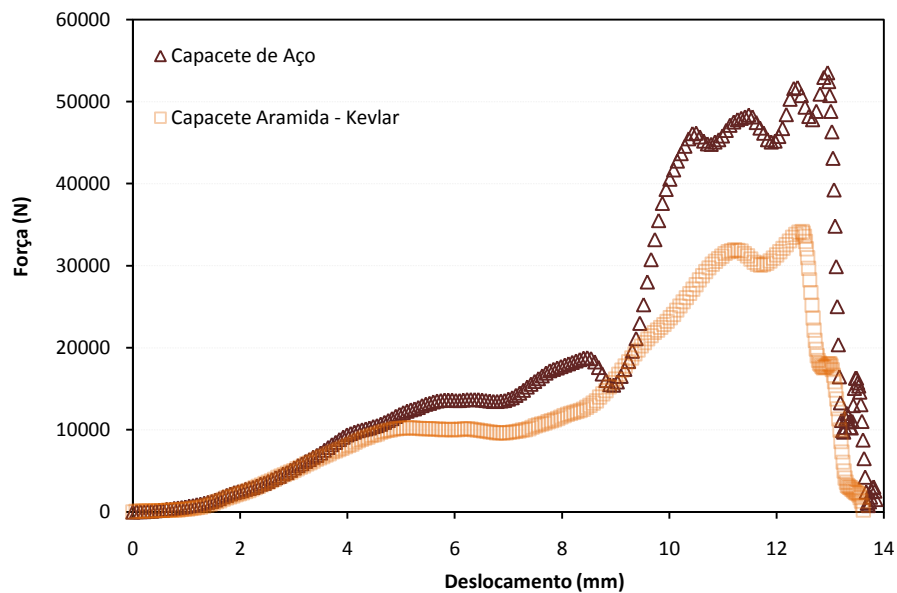


Figura 5.4 - Evolução comparativa da força transmitida pelas blindagens (capacetes) após impacto do projétil de calibre 9mm.

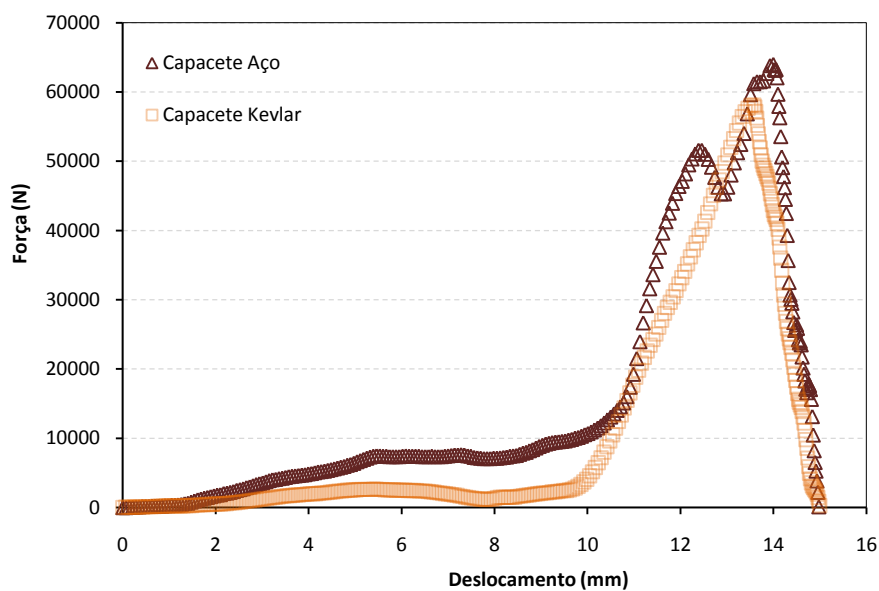


Figura 5.5 - Evolução comparativa da força transmitida pelas blindagens (capacetes) após impacto do projétil de calibre 5,56mm.

De seguida é então apresentado ao leitor os níveis energéticos (em percentagem e valor absoluto), que as blindagens conseguem absorver (tabela 5). Para tal procedeu-se ao cálculo por integração numérica das áreas contidas pelas ondas de pressão transmitidas, utilizando o método dos trapézios [61].

| | Energia Absorvida pela Blindagem a quando o impacto do projectil 9mm | | Energia Absorvida pela Blindagem a quando o impacto do projectil 5,56mm | |
|----------------------------|--|--------------------|---|--------------------|
| | (%) | Valor Absoluto [J] | (%) | Valor Absoluto [J] |
| Placa de Aramida | 35,3 | 112,96 | 36,9 | 118,08 |
| Tecido de Aramida | 33,8 | 108,16 | 36,1 | 115,52 |
| Placa de Policarbonato | 10,2 | 32,64 | 19,4 | 62,08 |
| Capacete de Aço | 17,3 | 55,36 | 25,4 | 81,28 |
| Capacete de Aramida/kevlar | 36,7 | 44,04 | 48,1 | 113,92 |

Tabela 5 - Fracção de energia absorvida pelas blindagens após os impactos realizados

Fazendo uma análise mais profunda dos dados obtidos, podem-se interpretar várias fases da relação projectil - blindagem. Desta forma para uma melhor compreensão, foram escolhidos dois gráficos com a evolução da força transmitida após impacto, para cada projectil.

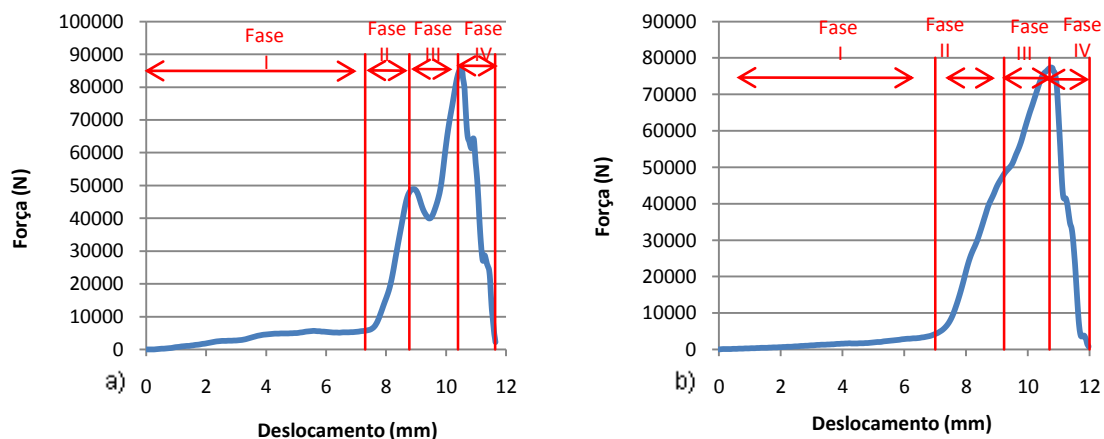


Figura 5.6 - Evolução da força transmitida após o impacto do projectil de calibre 5.56mm, com a representação das várias fases existentes: a) - impacto na placa de aramida. b) impacto no tecido aramida.

Para os ensaios balísticos efectuados com recurso ao projectil de calibre 5,56mm, podem identificar-se quatro fases distintas (Figura 5.6). A primeira está associada à adaptação do projectil ao meio (blindagem), a segunda fase corresponde à fase de penetração clara do projectil, a terceira fase está relacionada com a energia ainda existente na barra incidente e

que corresponde ainda a uma energia que possibilitaria ao projétil continuar o seu caminho. Por último, a quarta fase que está ligada ao recuo da barra incidente, tendo essa energia que ser englobada na mesma para o impacto do projétil, na medida que apesar de esta ser pouca, ainda é significativa pois provoca um ligeiro recuo do projétil (cerca de 1mm dependendo da blindagem a analisar), sendo esse ligeiro recuo traduzido num ligeiro avanço como aproximação. Referir, que nos casos em que existe perfuração total da blindagem por parte do projétil, as energias correspondentes às fases III e IV, são energias que supostamente o projétil ainda contém, para depois de furar as blindagens penetrar no seu utilizador.

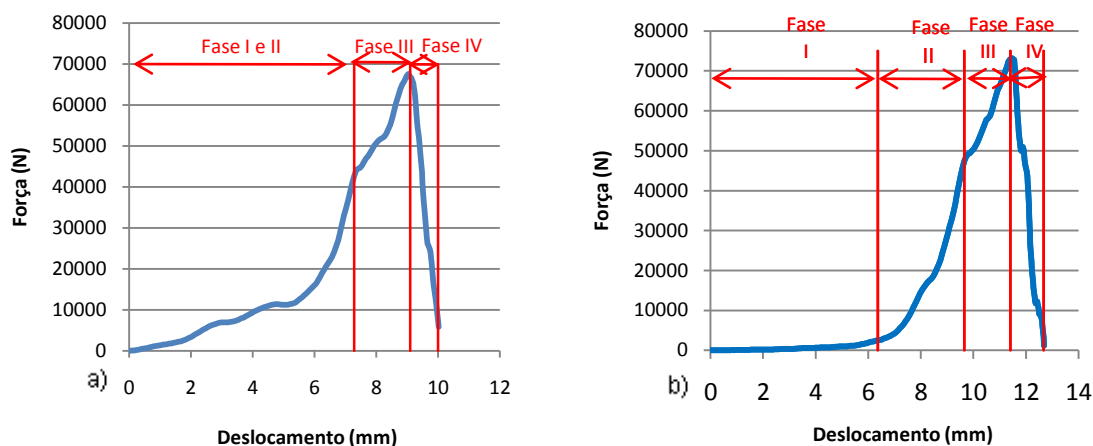


Figura 5.7 - Evolução da força transmitida após o impacto do projétil de calibre 9mm, com a representação das várias fases existentes: a) - impacto na placa de aramida. b) impacto no tecido aramida.

No que diz respeito aos ensaios realizados com recurso ao projétil de calibre 9mm, foram identificados dois casos possíveis.

O primeiro, que é referente às placas de aramida, ou às placas de policarbonato e/ou capacetes (que se pode visualizar por exemplo na figura 5.7a, para o caso concreto das placas de aramida). Neste e devido às características do projétil (derrubante), a primeira e segunda fase explicadas anteriormente, identificam-se praticamente como uma fase. Nesta pode-se verificar que logo desde início a força transmitida é muito superior, havendo uma certa analogia entre esta fase e um ensaio de compressão por parte do projétil na blindagem. As duas restantes fases são idênticas às explicadas para o projétil de calibre 5,56mm.

O segundo caso exequível de ser identificado é o do tecido aramida (Figura 5.7b), onde devido às características do material em questão (maior flexibilidade), a primeira fase passa a ser novamente de adaptação do projétil à blindagem. Aqui denota-se com facilidade que a energia transmitida comparativamente ao primeiro caso é muito baixa. No que diz respeito à segunda fase volta-se a verificar um ensaio de compressão puro por parte do projétil na blindagem. As restantes fases (3 e 4) apresentam-se como anteriormente já explicado.

Tal como já foi ligeiramente mencionado, e apesar de não se enquadrar no âmbito do presente trabalho, estes resultados e em particular os resultados apresentados na tabela 5, manifestam uma causa interessante, verifica-se que para o projétil de calibre 9mm a energia

transmitida ao utilizador é superior ao de calibre 5,56mm, certo facto faz muito sentido considerando as funções a que cada projectil se destina (explicado no capítulo 2).

5.2. Comportamento Mecânico e Degradação das Blindagens

Neste ponto ambiciona-se exibir ao leitor a degradação das várias blindagens seleccionadas. Quando se fala em degradação pretende-se mostrar o dano causado pelo projectil na blindagem (quer haja penetração ou não) e ainda analisar a perda ou não, da capacidade de absorção de energia por parte da blindagem, quando sujeita a um segundo impacto.

No que diz respeito à placa de aramida e à placa de policarbonato, quando sujeitas ao impacto de um projectil 5,56mm estas comportam-se de modo diferente do tecido aramida. O que se constatou nos ensaios realizados foi que tanto a placa de aramida, como a placa de policarbonato, não resistiram ao impacto do projectil, tendo este penetrado e perfurado de um lado ao outro a placa. No tecido aramida (devido às suas características flexíveis), apesar de haver penetração por parte do projectil, este não consegue perfurar na totalidade o tecido.

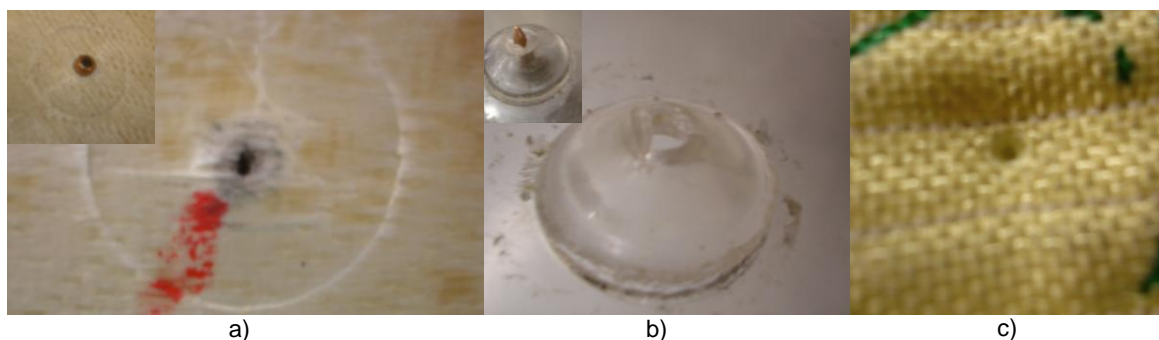


Figura 5.8 – Impactos nas blindagens seleccionadas com recurso ao projectil 5,56mm; a)- Placa de Aramida; b)- Placa de Policarbonato; c)- Tecido de Aramida.

Há ainda uma curiosidade interessante registada, que se deve à deformação do projectil ter sido mínima (Figura 5.9).



Figura 5.9 - Comparação de um projectil sem deformação (a) e um com deformação (b)

Relativamente às mesmas blindagens, mas quando sujeitas aos impactos provenientes de projecteis de 9mm, o seu comportamento é diferente pelo menos nos tecidos e placas de aramida, não existindo sequer penetração por parte do projectil (isto também devido às características deste – derrubante). Nas placas de policarbonato devido às características do próprio material (pouco flexível e rígido) o projectil consegue penetrar, mas não perfura na totalidade a blindagem.

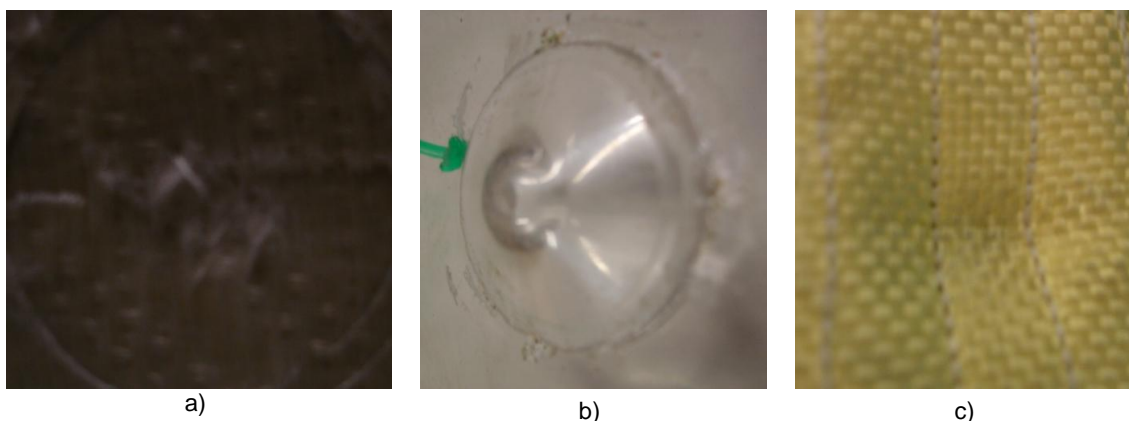


Figura 5.10 – Impactos nas blindagens seleccionadas com recurso ao projectil 9mm; a)- Placa de Aramida; b)- Placa de Policarbonato; c)- Tecido de Aramida.

Nestes ensaios há excepção dos realizados nas placas de policarbonato, tal como era pressuposto (uma vez que não há perfuração) os projecteis ficaram totalmente deformados.

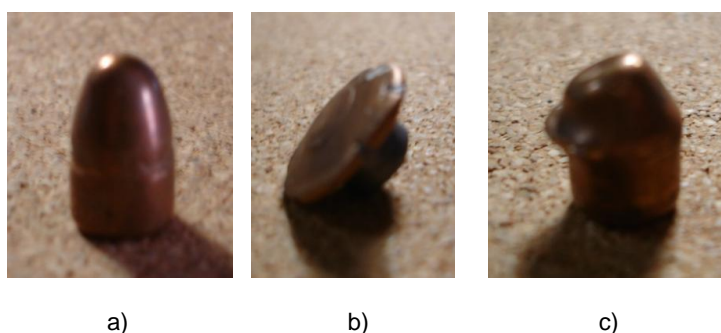
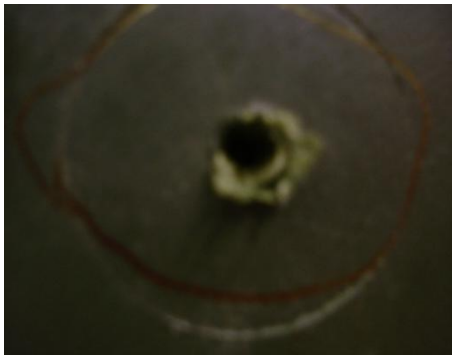


Figura 5.11 - Comparação de projecteis; a)- sem deformação; b)- deformação proveniente dos ensaios realizados na placa e tecido de aramida; c)- deformação proveniente do ensaio realizado na placa de policarbonato.

Quanto ao dano causado nos capacetes balísticos, este diferiu nos dois tipos de material em análise.

Nos capacetes balísticos de kevlar, e para os ensaios realizados com o projectil de 5,56mm, pôde-se constatar que existiu uma penetração e perfuração total. Para a mesma blindagem, mas com a munição de calibre 9mm, não houve perfuração total, tendo mesmo assim existido um dano ainda substancial na blindagem, na medida que esta sofreu dano quer na sua face exterior, quer na sua face interior.



a)



b)

Figura 5.12 – Impacto no capacete balístico de kevlar com recurso ao projétil 5,56mm; a)-Face exterior;
b)- Face interior.



a)



b)

Figura 5.13 - Impacto no capacete balístico de kevlar com recurso ao projétil 9mm; a)-Face exterior;
b)- Face interior.

Referir ainda a título de curiosidade, que o projétil de 5,56mm voltou a apresentar uma deformação mínima, tal como apresentado na figura 5.9. O projétil de 9mm teve um comportamento semelhante ao apresentado na figura 5.11c, em que a deformação do projétil foi mínima.

No que concerne aos capacetes balísticos de aço, estes apresentam uma resposta totalmente diferente. Nesta blindagem, quer nos ensaios realizados com recurso aos projéteis de 5,56mm, quer nos ensaios com recurso ao de 9mm, nunca houve penetração por parte dos projéteis e aliás o dano causado foi diminuto. Em relação à deformação dos projéteis, o de calibre de 9mm teve uma deformação semelhante à apresentada na figura 5.11b. O de calibre 5,56mm teve pela primeira vez um comportamento nunca anteriormente (em todos os ensaios realizados) constatado, tendo-se deformado completamente (Figura 5.14c).

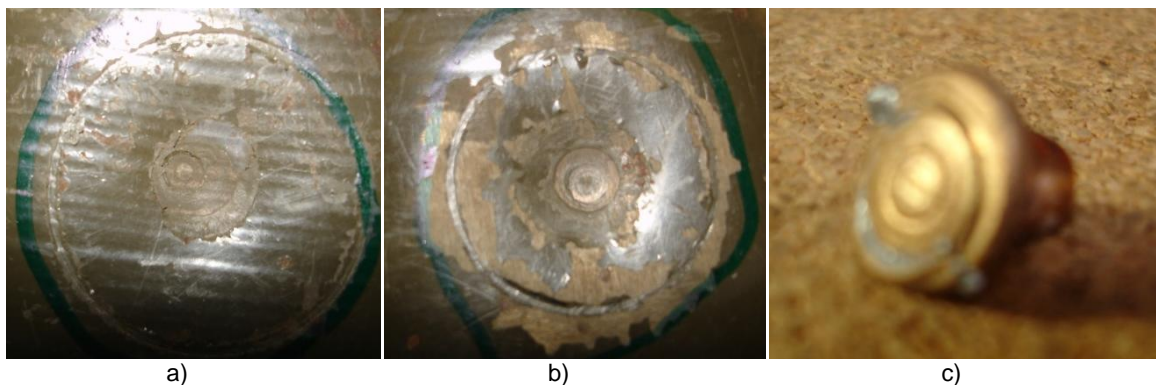


Figura 5.14 - Impacto no capacete balístico de Aço; a)- com recurso ao projectil 5,56mm; b)- com recurso ao projectil de 9mm; c)- Deformação do projectil de 5,56mm utilizado no impacto na blindagem.

Antes de entrar na análise das blindagens sujeitas a um segundo impacto, referir que os resultados permitem verificar que o dano causado pelos impactos de um projectil de calibre 5.56 mm é muito mais localizado que o de 9 mm, provocando uma maior penetração na blindagem. Os impactos do projectil de calibre 9 mm danificam uma maior área embora com menor profundidade.

No que diz respeito à perda ou não da capacidade de absorção de energia por parte da blindagem, quando sujeita a um segundo impacto, após a realização da segunda série de ensaios, foi possível obter os resultados relativos à capacidade das blindagens em estudo. Referir, que nas blindagens de polycarbonato, ao contrário do que estava previsto no plano de ensaios, não foi realizado um segundo impacto, pois a blindagens já apresentavam um estado de deterioração bastante elevado, não permitindo assim efectuar uma análise fidedigna dos dados obtidos.

As Figuras 5.15 e 5.16 apresentam a evolução da força – deslocamento, após um impacto nas amostras de blindagem proveniente dos projecteis de calibre 9 mm e 5,56mm.

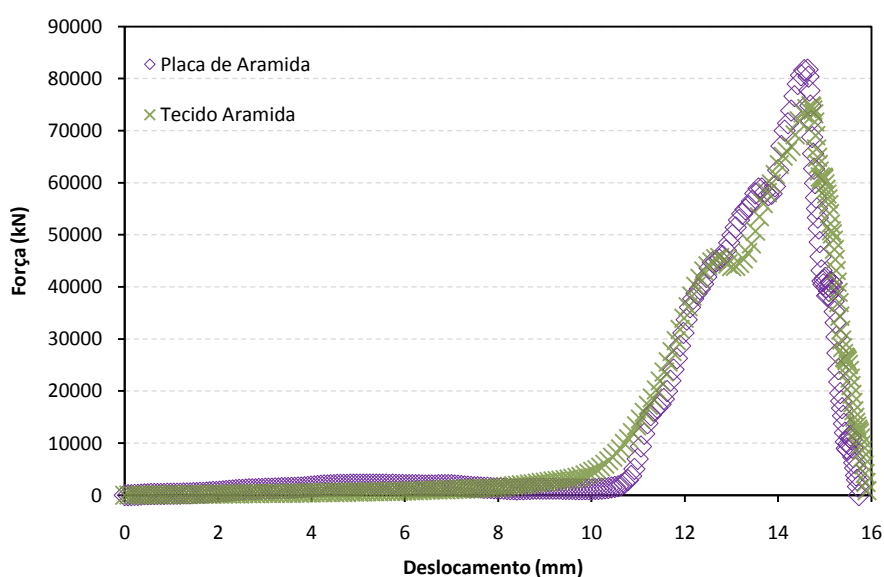


Figura 5.15 - Evolução comparativa da força transmitida pelas blindagens após impacto do projectil de calibre 5,56mm.

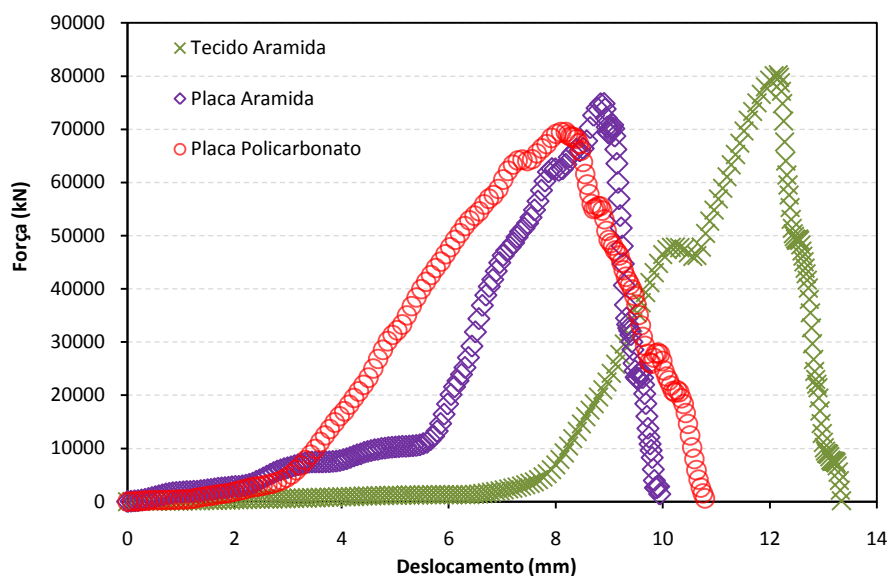


Figura 5.16 – Evolução comparativa da força transmitida pelas blindagens após impacto do projétil de calibre 9mm.

Mais uma vez recorrendo à integração numérica dos gráficos apresentados nas figuras 5.15 e 5.16, determinou-se os níveis energéticos (em percentagem e valor absoluto), que as blindagens conseguem absorver (Tabela 6) para um segundo impacto.

| | Energia Absorvida pela Blindagem a quando o impacto do projétil 9mm | | Energia Absorvida pela Blindagem a quando o impacto do projétil 5,56mm | |
|----------------------------|---|--------------------|--|--------------------|
| | (%) | Valor Absoluto [J] | (%) | Valor Absoluto [J] |
| Placa de Aramida – Kevlar | 30,7 | 98,24 | 31,8 | 101,76 |
| Tecido de Aramida – Kevlar | 27,8 | 86,40 | 27,9 | 89,28 |
| Placa de Policarbonato | 3 | 9,60 | | |

Tabela 6 - Fracção de energia absorvida pelas blindagens após o segundo impacto realizado.

Comparando os valores apresentados na tabela 5 e os da 6, podemos verificar uma maior fracção de energia transmitida do primeiro para o segundo impacto explicado pela degradação sucessiva das blindagens. Desta segunda análise poderemos identificar duas situações.

A primeira prende-se com o facto de a energia absorvida pelo tecido de aramida, no caso do impacto do projectil de 9mm e de 5,56mm ser muito idêntica, isto pode ser explicado com o facto de no primeiro ensaio o projectil de 5,56mm, ter provocado um dano superior, tendo inclusive penetrado na blindagem. Assim desta forma o projectil de 5,56mm encontrou uma menor resistência nos instantes iniciais (pois o tecido já se encontrava parcialmente furado), o que leva a perceber que desta forma a blindagem tenha tido uma menor capacidade em absorver as energias e ao mesmo tempo apresentar características semelhantes ao ensaio realizado com recurso ao de projectil de 9mm (que tem características derrubantes, ou seja, nestes ensaios a energia transmitida ao utilizador normalmente seria superior).

A segunda análise que pode ser feita é relativa aos ensaios realizados à placa de policarbonato. Nestes, é notório a falta de capacidade por parte destas blindagens em absorver as energias envolvidas, sendo ainda mais evidente tal facto no segundo ensaio. Tal constatação, não é de estranhar, pois na realidade os escudos anti-tumulto não se destinam a receber impactos de projecteis, mas sim de objectos contundentes de grandes dimensões e a baixas velocidades, apesar de que podem conferir (tal como foi referido anteriormente neste trabalho) protecção balística de nível 2. A verdade é que mesmo ao segundo impacto, realizado com o projectil de 9mm, não houve perfuração total da blindagem (Figura 5.17).

Acabar só por referir, que em todos os ensaios, apesar da blindagem já se encontrar fragilizada, só houve penetração e perfuração total nas placas de aramida por parte do projectil de 5,56mm, todos os restantes ensaios, quer com o calibre 5,56mm, quer com o de 9mm, a blindagem respondeu de forma semelhante ao já descrito no primeiro impacto.



Figura 5.17 – Segundo impacto na placa de policarbonato, com recurso ao projectil de 9mm.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO

6.1. Conclusões

Com o presente trabalho, foi possível concluir numa primeira análise, de que o disparador electromagnético, bem como todo o aparato experimental desenvolvido, se apresentam como uma mais-valia para a realização de ensaios balísticos. Esta nova concepção estrutural permitiu activações lineares silenciosas com elevadas taxas de energia. Permitiu ainda que os ensaios balísticos fossem realizados em laboratório com ambiente controlado, não existindo libertação de fumos ou clarões, e não sendo assim necessário recorrer a uma carreira de tiro. Esta nova concepção permitiu avaliar as blindagens não só qualitativamente, mas também quantitativamente. Pela primeira vez em Portugal, surgiu assim um novo mecanismo que possibilita analisar e compreender as energias realmente absorvidas pela blindagem e as que são transmitidas ao seu utilizador. A única limitação que poderá ser apontada a este aparato, será a necessidade de existência de corrente eléctrica, para a alimentação do banco de potência.

O aparato foi desenvolvido com base no tradicional sistema de Hopkinson, sendo projectado de modo a possibilitar ajustes concepcionais para aplicação em diversas áreas industriais de configuração específica. Desenvolveu-se assim, um sistema que permite não só avaliar blindagens, mas também quando necessário ser utilizado para a caracterização mecânica de materiais a alta velocidade. A unidade de potência desenvolvida e implementada permitiu ainda regular com precisão a velocidade de disparo, podendo ser utilizado qualquer tipo de projectil de armas ligeiras individuais (dependendo para isso adaptar o sistema de acoplagem dos projecteis).

É importante mencionar que aquando das descargas, se verificou que para se obter uma descarga rápida, o ganho de energia armazenada em série comparativamente a paralelo não compensa, pelo menos para tensões inferiores aos 2000Volts, pois um factor importante é obter um di/dt elevado, e tal consegue-se mais facilmente com os condensadores em paralelo.

No que diz respeito aos ensaios balísticos desenvolvidos pode-se concluir que:

- Em primeira instância os capacetes balísticos mostraram não ser adequados para o efeito desejado. Pôde-se constatar que a única resposta positiva por parte destes se deu no capacete de kevlar, quando sujeito ao impacto do projectil de 9mm. Pois este mesmo capacete quando sujeito ao impacto do projectil de 5,56mm não aguentou, sendo perfurado na sua totalidade. No que diz respeito aos capacetes de aço, apesar de estes nunca terem sido perfurados, denotou-se que a absorção de energia é limitada, sofrendo o seu utilizador um grande impacto. Assim como este elemento de protecção balística se destina a proteger uma

das partes fundamentais e mais sensíveis do ser humano, as energias que passam para o seu utilizador no caso dos capacetes de aço são demasiado elevadas, causando-lhe possivelmente danos internos.

Desta forma deverá certamente ser repensada a política de aquisição de capacetes balísticos, pois os existentes actualmente ao serviço do Exército Português, não apresentam garantias de serem seguros.

- No que diz respeito às placas de aramida, tecido aramida e placas de policarbonato, pôde-se constatar que quando sujeitas a impactos de projecteis de 5,56mm, a blindagem que melhor se comportou foi o tecido de aramida, pois apesar de ter sofrido dano pelo projectil, este não foi totalmente perfurado, como se verificou nas placas de aramida e policarbonato. Se tal facto é de certa forma admissível acontecer nas placas de policarbonato (pois tem efectivamente um destino diferente, tal como foi referido anteriormente), tal não é admissível nas placas de aramida, pois estas supostamente deveriam oferecer protecção balística ao seu utilizador. O tecido aramida teve ainda aliado a este factor (perfuração), o facto de que foi o que conseguiu absorver melhor as energias envolvidas.

Em relação aos ensaios realizados com recurso ao projectil de calibre 9mm, pôde-se aqui constatar que a resposta por parte das blindagens é suficientemente satisfatória, não existindo perfuração, e tendo o material absorvido uma parte significativa da energia envolvida (no caso do tecido e placa de aramida).

Apesar das protecções balísticas apresentarem resultados animadores no que se refere aos impactos de projecteis de 9mm, também aqui surge novamente a necessidade de repensar as protecções balísticas, pois foi notório que as placas de aramida não conferem uma protecção satisfatória para os impactos provenientes de projecteis de 5,56mm.

- Pôde-se constatar que para o caso extremo de um segundo impacto no mesmo local do primeiro, o tecido aramida dá uma excelente resposta ao impacto do projectil de 5,56mm, resistindo à perfuração total. Conclui-se ainda que em termos de absorção de energia este também dá uma boa resposta, se tivermos em conta que geralmente este tipo de blindagem não é para estar sujeito a um segundo impacto no mesmo local, pois existe sempre por parte do militar uma preocupação constante em evitar ser atingido.

- Por último e tendo como base a tabela 5, pode-se concluir que teoricamente (nos casos em que houve perfuração total da blindagem) o projectil teria possivelmente energia para perfurar o seu utilizador, uma vez que em nenhum dos casos a energia absorvida pela blindagem foi superior a 50%. Em todos os casos verificados denota-se que existe uma grande parte de energia remanescente a ser absorvida pelo utilizador, o que se traduz em determinados casos numa pancada seca (projectil de 9mm), noutros (projectil de 5,56mm) traduz-se possivelmente numa perfuração por parte do projectil no utilizador da blindagem.

Referir, que a metodologia adoptada permitiu analisar as blindagens em caso extremo, permitindo assim conhecer as suas limitações em condições mais desfavoráveis do que as verificadas na maioria dos casos a que costumam estar sujeitas. Desta forma é possível afirmar que se as blindagens conseguirem absorver estes níveis de energia nestas condições, irão certamente ter melhor desempenho na maioria dos casos reais.

Por fim, mencionar que a metodologia agora desenvolvida apresenta-se como uma mais-valia, na medida que possibilitará ao Exército Português, a quando futuras aquisições de blindagens efectuar avaliações independentes, podendo desta forma verificar os parâmetros desejados das aquisições.

6.2. Trabalho Futuro

Ainda que os principais objectivos deste trabalho tenham sido alcançados, existem pontos de interesse a ser melhorados, como por exemplo a introdução de um maior número de condensadores no banco de potência, permitindo assim níveis maiores de energia envolvidos nos disparos. Caso este aspecto seja seguido, é necessário ter em conta, um dos elementos estruturais mais frágeis do disparador, a barra de impacto. Deverá ser feito um estudo de modo a verificar se esta aguenta as novas energias em causa. Outro facto que poderá ser melhorado é o sistema de acoplagem do projectil. O ideal seria desenvolver algo, que permitisse ao projectil a partir de certa altura, percorrer um determinado percurso sem auxílio do sistema de acoplagem. Tal facto não foi tido em conta neste, devido ao tempo ser escasso para as inúmeras exigências na execução de um projecto como este.

De modo a que se possa ter uma noção real se a energia existente nas fases III e IV, é suficiente ou não para perfurar o utilizador da blindagem, poderiam ser utilizadas gelatinas balísticas, nas quais seriam efectuados disparos com níveis de energia semelhantes aos das fases em questão.

Do ponto de vista científico e também de certa forma industrial, agora que a Área Científica de Tecnologia Mecânica e Gestão Industrial/Academia Militar tem um equipamento que permite realizar a caracterização mecânica de materiais a alta velocidade, muitos estudos podem ser realizados. Estudos de novos projecteis, que permitam perfurar outros tipos de blindagens e o desenvolvimento de novos materiais para aplicação em novas blindagens, são por exemplo futuros projectos interessantes a realizar. Para tal será necessário um investimento ou a participação de outros intervenientes, pois desenvolver projecteis e novas blindagens envolverá certamente custos elevados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] <http://www.ame.arizona.edu/research/wchen/>;
- [2] BRANCO, Carlos A. G. de Moura, *Mecânica dos Materiais*, 3ª edição, Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 1998;
- [3] STANAG 4569, *Protection levels for occupants of logistic and light armoured vehicles*, ed. 1, 1999;
- [4] <http://www.cbc.com.br/>;
- [5] http://www2.dupont.com/Kevlar/en_US/assets/downloads/KEVLAR_Technical_Guide.pdf
- [6] JIMÉNEZ, Fernando Pintado, *Tecnove Security*, Departamento de Proyectos Estratégicos y Defensa, 2005;
- [7] ALMAGRO, Víctor Manuel Cejudo Martín de, *Tecnove Security*, Departamento de Proyectos Estratégicos y Defensa, 2006;
- [8] OFERTA TÉCNICA, *Ensayos balísticos*, Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, Espanha, 2006;
- [9] OFERTA TÉCNICA, *Ensaaios balísticos*, Banc officiel dépreuve des armes et munitions, França, 2006;
- [10] Norma UNE-EN-1063, *Blindagem transparente*, 2006;
- [11] STANAG 2920, *Record of amendments*, edition 1;
- [12] STANAG 4164, *Test Procedures for Armour Perforation Tests of Anti-Armour Ammunition*, 1999;
- [13] MONTEIRO, Pedro S., *Avaliação do Desempenho de Blindagens na Protecção de Pessoas e Equipamentos*, Instituto Superior Técnico, Outubro 2007;
- [14] TELO, António José; ÁLVARES, Maj. Inf. Mário, *Armamento do Exército Português*, Defesa e Relações Internacionais, Vol. I – Armamento Ligeiro, Projecto de Investigação da Academia Militar;
- [15] SILVA, Ten. Cor. Cav. Rodrigues da, *Munições de Armas Ligeiras*, Elementos de Armamento, Academia Militar, 2004/2005;
- [16] ÁLVARES, Ten. Cor. Eng. J.M. da Costa, *Balística Externa*, Serviços Gráficos da Academia Militar, 1984/85;
- [17] SILVA, Major Nunes, *Tiro*, Escola do Exército, 1941;
- [18] National Institute of Justice Technology Assessment Program, *NIJ Standard 0101.03 - Ballistic Resistance of Police Body Armor*, U.S., 1987;
- [19] http://fr.wikipedia.org/wiki/5,56_%C3%97_45_mm_OTAN ;
- [20] http://en.wikipedia.org/wiki/9x19mm_Parabellum;

- [21] FACKLER, M.L., *Bullet performance misconceptions*, International Defense Review, 1987;
- [22] HOGG, Ian V., *The Illustrated Encyclopedia of Ammunition*, Quantum Books, 2003;
- [23] http://www.norma.cc/javapage_metric2.asp?Lang=2;
- [24] STANAG 4190, *Test Procedures for Measuring Behind-Armour Effects of Anti-Armour Ammunition*, 1999;
- [25] STANAG, *Ballistic test method for personal armour materials and combat clothing*, edition 2;
- [26] <http://www.earmi.it/balistica/gelatina.htm>;
- [27] <http://www.hpwhite.com/resources/>;
- [28] U.S. Lindholm, *High Strain Rate Testing, Part 1: Measurement of mechanical properties, techniques of metals research*, Wiley Interscience, New York, 1971;
- [29] P.S. Follansbee, *The Hopkinson bar, mechanical testing*, ASM Handbook, American Society for Metals, 1985;
- [30] D.R. Chichili and K.T. Ramesh, *Recovery experiments for adiabatic shear localization: a novel experimental technique*, Trans. ASME, 1999;
- [31] J.D. Campbell and W.G. Ferguson, *The temperature and strain rate dependence of the shear strength of mild steel*, Philos.Mag., 1970;
- [32] J.R. Klepaczko, *An experimental technique for shear testing at high and very high strain rates: the case of a mild steel*, Int. J. Impact Eng., 1994;
- [33] J.R. Klepaczko, H.V. Nguyen, and W.K. Nowacki, *Quasi-static and dynamic shearing of sheet metals*, Eur. J. Mech. A-Solids, 1999;
- [34] J. Klepaczko, *Application of the split Hopkinson pressure bar to fracture dynamics*, Inst. Phys. Conf. Ser., 1980;
- [35] M.M. Al-Mousawi, S.R. Reid, and W.F. Deans, *The use of the split Hopkinson pressure bar techniques in high strain rate materials testing*, Proc. Inst. Mech. Eng., Part C: J. Mech. Eng. Sci., 1997;
- [36] D.A. Gorham, P.H. Pope, and J.E. Field, *An improved method for compressive stress-strain measurements at very high strain rates*, Proc. R. Soc., London, 1992;
- [37] R.M. Davies, *A simple modification of the Hopkinson pressure bar*, Proc. 7th Int. Cong. on Applied Mechanics, 1948;
- [38] R.M. Davies, *A critical study of the Hopkinson pressure bar*, Philos. Trans. R. Soc., London, 1948;
- [39] H. Kolsky, *An investigation of the mechanical properties of materials at very high rates of loading*, Proc. Phys. Soc., London, 1949;
- [40] U.S. Lindholm and L.M. Yeakley, *High strain rate testing: tension and compression*, Exp. Mech., 1968;
- [41] H. Kolsky, *Stress waves in solids*, J. Sound Vib., 1964;

- [42] GRAY, George; T. Rusty III, *High Strain-Rate Testing of Materials: The Split Hopkinson Bar. Methods in Materials Research*, John Wiley Press, 1997;
- [43] LINDHOLM, *Some experiments with the split-Hopkinson pressure bar*, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 12, pp.317-335, U. S., 1964.
- [44] KAISER, Michael Adam, MSc Thesis, *Advancements in the Split Hopkinson Bar Test*, Virginia (USA), 1998;
- [45] <http://www.coilgun.eclipse.co.uk>;
- [46] BARBOSA, Pedro M. C., *Comportamento Mecânico de Materiais a Elevada Velocidade de Deformação: Desenvolvimento de uma Barra de Hopkinson*, Instituto Superior Técnico, Outubro 2005;
- [47] SILVA, C. M. A.; MARTINS, P. A. F.; ROSA, P. A. R. e BASTOS J. R., (2008a), *Actuador linear simultâneo de relutância magnética*, Pedido de patente PT 104165 / INPI.
- [48] MALVINO, Albert Paul, *Princípios de Electrónica volume 1 e 2*, 6ª Edição, McGraw-Hill, 1999;
- [49] http://pt.wikipedia.org/wiki/Circuito_RLC ;
- [50] FRANCA, Epifânio da, *Teoria dos Circuitos e Fundamentos de Electrónica*, Parte 1 – Fundamentos, Secção de Folhas – Associação de Estudantes do Instituto Superior Técnico;
- [51] BOYLESTAD, Robert e Louis Nashelsky, *Electronic Devices and Circuit Theory*, 9th ed, Prentice Hall, 2005;
- [52] JACKSON, John D., *Classical Electrodynamics*, 3rd ed., Wiley, 1998;
- [53] TIPLER, Paul, *Physics for Scientists and Engineers: Light, Electricity and Magnetism*, 4th ed., W. H. Freeman, Vol. 2, 1998;
- [54] VILLATE, Jaime E., *Electromagnetismo*, McGraw-Hill, 1999;
- [55] KAISER, Michael Adam, MSc Thesis, “Advancements in the Split Hopkinson Bar Test”, Virginia (USA), 1998; <http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-41998-18465/>;
- [56] SALISBURY, Christopher, MSC Thesis, “*Spectral Analysis of Wave Propagation Through a Polymeric Hopkinson Bar*”, Ontario (Canada), 2001; <http://etd.uwaterloo.ca/etd/cpsalisb2001.pdf>;
- [57] SALISBURY, Christopher, MSC Thesis, *Spectral Analysis of Wave Propagation Through a Polymeric Hopkinson Bar*, Ontario (Canada), 2001;
- [58] McGraw-Hill, *Encyclopedia of Science & Technology*, Vol. 10 LEP-MES, 8th Edition, 1997;
- [59] CHAPMAN, Stephen J., *Electric Machinery Fundamentals*, Fourth Edition, McGraw-Hill, 2005;
- [60] http://en.wikipedia.org/wiki/Eddy_current;
- [61] BURDEN, Richard L., FAIRES J. Douglas, *Numerical Analysis*, 7th Ed., Brooks/Cole, 2000.

ANEXOS

Anexo 1

| | PROPRIEDADES | VALOR | COMENTÁRIOS |
|-------------------------------|-------------------------|------------------------|-------------|
| PROPRIEDADES FÍSICAS | Densidade | 1440 Kg/m ³ | |
| PROPRIEDADES MECÂNICAS | Tensão de Rotura | 3620 MPa | |
| | Tensão de Cedência | 530 MPa | |
| | Módulo de elasticidade | 205 GPa | |
| | Coeficiente de Poisson | 0.36 | |
| | Extensão à Rotura | 2.4 % | |
| PROPRIEDADES TÉRMICAS | Condutibilidade Térmica | 0.04 W/mK | |
| | Calor Específico | 340 J/Kg K | A 25°C |

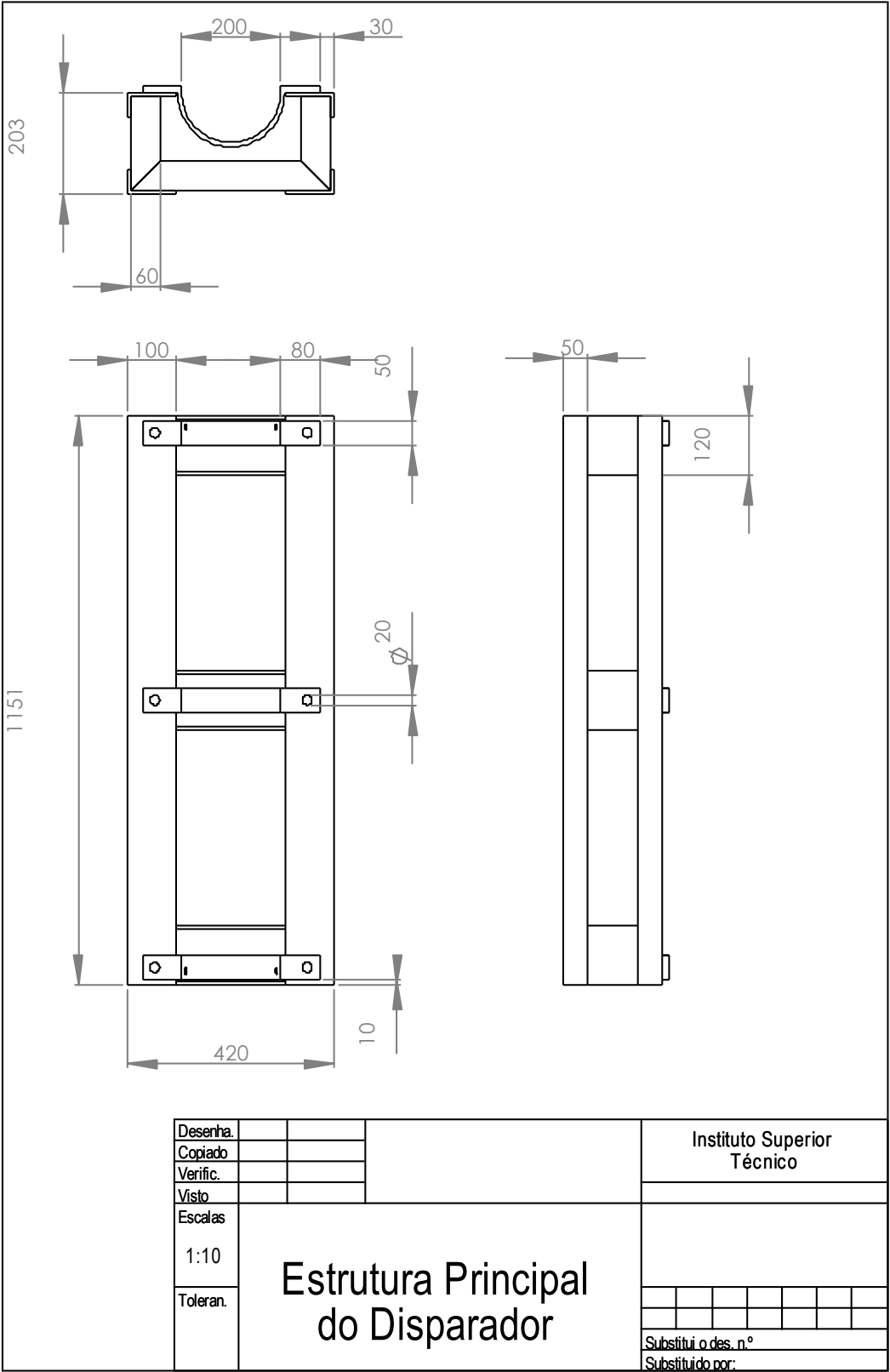
Tabela A 1 - Principais propriedades do Kevlar

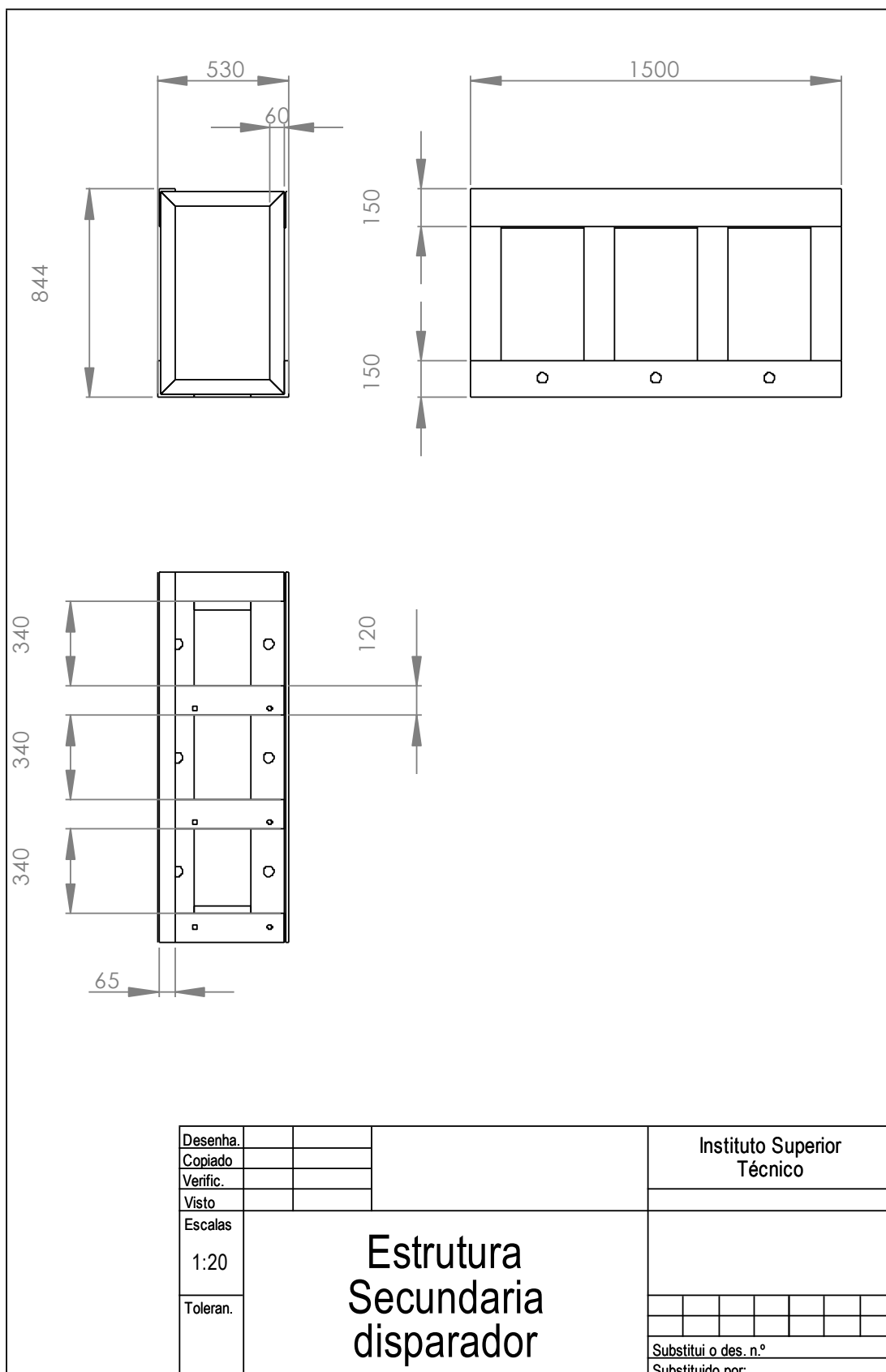
Anexo 2

| | PROPRIEDADES | VALOR |
|--------------------------------|-------------------------|------------------------|
| PROPRIEDADES FÍSICAS | Densidade | 1200 Kg/m ³ |
| PROPRIEDADES MECÂNICAS | Dureza (Rockwell) | 70.9 |
| | Tensão de Rotura | 64 MPa |
| | Tensão de Cedência | 62 MPa |
| | Módulo de elasticidade | 2.3 GPa |
| | Extensão à Rotura | 97.9 % |
| PROPRIEDADES TÉRMICAS | Condutibilidade Térmica | 0.2 W/mK |
| | Calor Específico | 1200 J/Kg K |
| PROPRIEDADES ELÉCTRICAS | Resistividade Eléctrica | 7E16 Ω.cm |

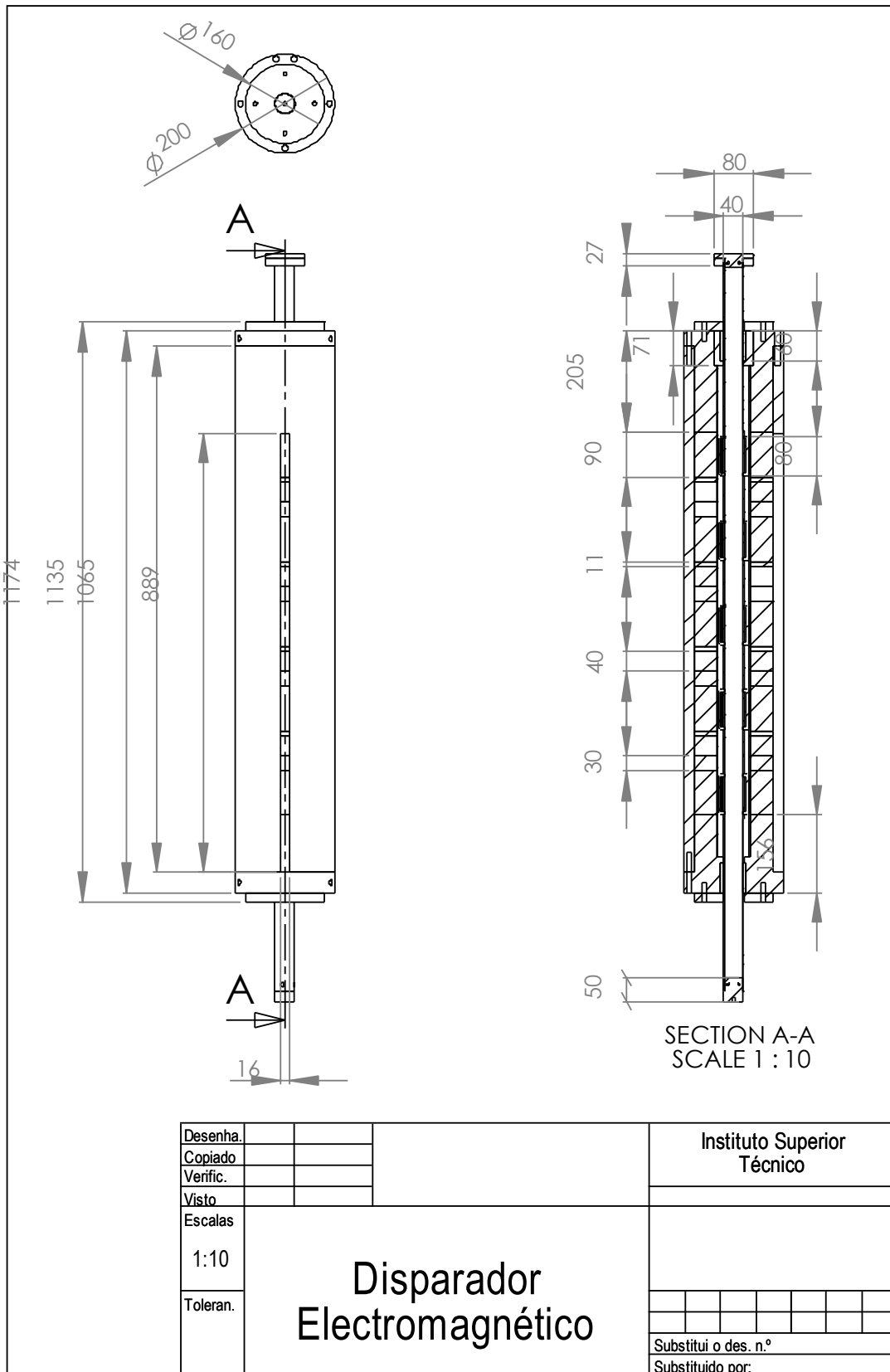
Tabela A 2 - Principais propriedades dos policarbonatos

Anexo 3 - Desenhos Técnicos da Bancada de Ensaios





Anexo 4 - Desenhos Técnicos dos Constituintes do Disparador Electromagnético



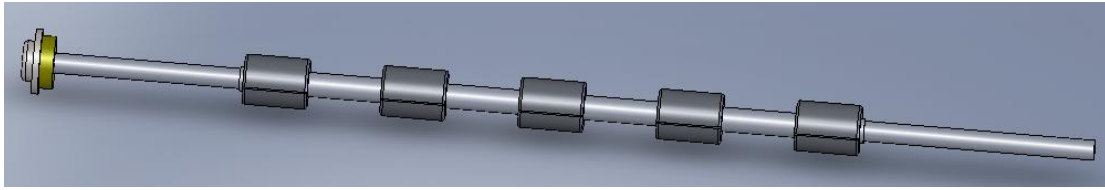
Anexo 5

| | PROPRIEDADES | VALOR | COMENTÁRIOS |
|--------------------------------|-------------------------|------------------------|--|
| PROPRIEDADES FÍSICAS | Densidade | 8920 Kg/m ³ | |
| PROPRIEDADES MECÂNICAS | Dureza (Brinell) | 89 | Convertido da dureza de Vickers para uma carga de 500 Kg / esfera de 10 mm |
| | Dureza (Rockwell) | 35 | Convertido da dureza de Vickers |
| | Dureza (Vickers) | 100 | |
| | Tensão de Rotura | 210 MPa | |
| | Tensão de Cedência | 33.3 MPa | |
| | Módulo de elasticidade | 110 GPa | |
| | Coefficiente de Poisson | 0.343 | |
| | Extensão à Rotura | 60 % | |
| PROPRIEDADES TÉRMICAS | Condutibilidade Térmica | 385 W/mK | Aço Típico |
| | Calor Específico | 385 J/Kg K | |
| PROPRIEDADES ELÉCTRICAS | Resistividade Eléctrica | 1.7E-006 Ω.cm | Amostra recozida; 0°C (32°F) |

Tabela A 3 - Principais propriedades do cobre utilizado no fabrico das bobinas.

Anexo 6 - Hipóteses postas em causa na fase de projecto da barra de impacto.

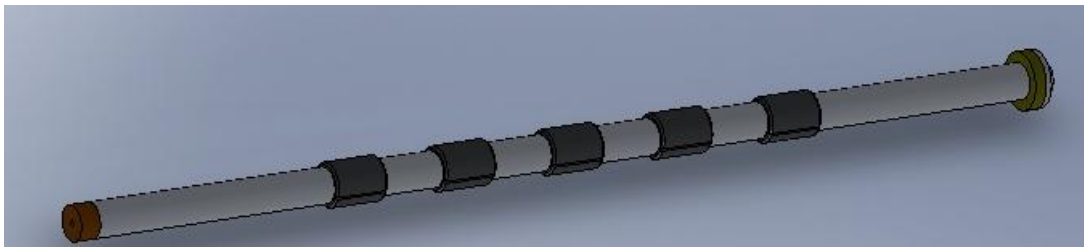
1º Montagem



Massa = 6595.55 gramas

Varão de alumínio de 30mm e comprimento de 1479mm; batente (jusante) de alumínio; carcaças de aço.

2º Montagem

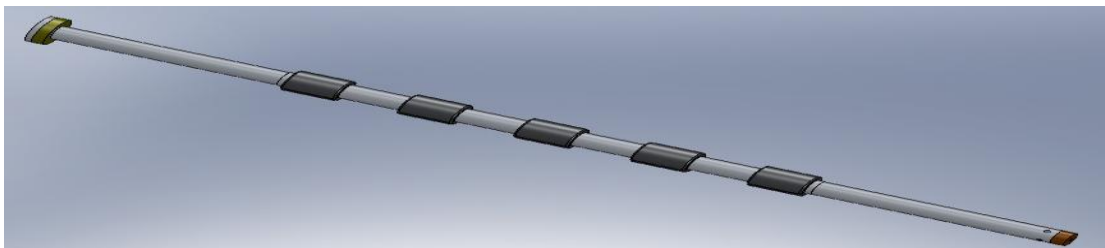


Massa = 6527.68 gramas

Tubo de alumínio de 50mm com 5mm de espessura e comprimento de 1483mm; batente (montante) e carcaças em aço; batente (jusante) alumínio.

Comprimento da bala total 1526mm.

3º Montagem



Massa = 5223.39 gramas

Tubo de alumínio de 40mm com 2,5mm de espessura, na zona dos carcaças o tubo tem 42mm de diâmetro, ficando assim com uma espessura de 3,5mm. O comprimento é de 1484mm; batente (montante) e carcaças em aço; batente (jusante) alumínio.

Comprimento da bala total 1526mm.

NOTA: não foram considerados outros tipos de materiais não magnéticos devido ao seu custo.